



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EMILLY CORRÊA COÊLHO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE
CORRENTE PARA RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA SOB
VARIAÇÕES DE IRRADIÂNCIA**

TUCURUÍ

2026

EMILLY CORRÊA COÊLHO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE
CORRENTE PARA RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA SOB
VARIAÇÕES DE IRRADIÂNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira.

TUCURUÍ

2026

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

- C672a Coêlho, Emilly Corrêa.
Avaliação de desempenho de técnicas de controle de
corrente para rastreamento de máxima potência sob
variações de irradiância / Emilly Corrêa Coêlho. — 2026.
53 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal
do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Civil, Tucuruí, 2026.
1. Sistemas fotovoltaicos. 2. MPPT. 3. Controle de
corrente. I. Título.

CDD 620

EMILLY CORRÊA COELHO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE
CORRENTE PARA RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA SOB
VARIAÇÕES DE IRRADIÂNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 06/05/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **DAVI CARVALHO MOREIRA**
Data: 27/05/2026 08:26:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **ANDRECIA PEREIRA DA COSTA**
Data: 27/05/2026 09:24:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS MARCLEY CARVALHO DOS SANTOS**
Data: 27/05/2026 08:47:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Eng. Lucas Marcley Carvalho
dos Santos**
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

TUCURUÍ

2026

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE CORRENTE PARA
RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA SOB VARIAÇÕES DE IRRADIÂNCIA**

DISCENTE: EMILLY CORRÊA COELHO

MATRÍCULA: 202133940020

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Prof. Dr. Davi Moreira	Prof. Dra. Andrécia Perreira	Prof. Eng. Lucas Marcley
Formatação	9,50	9,50	9,50
Linguagem (gramática e semântica)	10,00	10,00	10,00
Conteúdo técnico	10,00	9,50	9,50

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Prof. Dr. Davi Moreira	Prof. Dra. Andrécia Perreira	Prof. Eng. Lucas Marcley
Sequência lógica de apresentação	10,00	10,00	10,00
Administração do tempo	10,00	10,00	10,00
Expressão oral	10,00	10,00	10,00
Domínio do tema	10,00	10,00	10,00

Média por Examinador	9,93	9,86	9,86
Média Final	9,88		
Conceito Final	EXC		

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **DAVI CARVALHO MOREIRA**
Data: 27/05/2026 08:29:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador
Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira

Documento assinado digitalmente
 **ANDRECIA PEREIRA DA COSTA**
Data: 27/05/2026 09:19:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Interno
Prof. Dra. Andrécia Pereira da Costa

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS MARCLEY CARVALHO DOS SANTOS**
Data: 27/05/2026 08:45:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Interno
Prof. Eng. Lucas Marcley Carvalho dos Santos

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, proteção e por guiar cada passo da minha trajetória até aqui.

Aos meus pais, Elisandra Corrêa Coelho e Manoel Martins Coelho, pela dedicação, amor e apoio em cada etapa da minha vida.

À minha irmã, Emanuely Corrêa Coelho, cuja presença e alegria tornaram meus dias mais leves e me motivaram ainda mais.

Ao meu namorado, pelo carinho, paciência e incentivo constante.

Ao meu orientador, Davi Carvalho Moreira, pela orientação cuidadosa, pela paciência e pela disponibilidade em cada etapa do desenvolvimento deste estudo.

À banca examinadora, pela atenção, pelo tempo dedicado e pelas valiosas contribuições oferecidas ao aprimoramento deste trabalho.

Agradeço também à Faculdade de Engenharia Elétrica e ao corpo docente, que não apenas transmitiram conhecimento técnico, mas também valores e aprendizados que levarei comigo tanto para a vida profissional quanto para a pessoal.

E deixo um agradecimento especial aos meus colegas de faculdade, que fizeram parte de cada etapa desta jornada. Foram conversas, estudos, desafios superados juntos e momentos de apoio que tornaram esse caminho mais leve e significativo.

"Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos"
(Provérbios 16:3).

RESUMO

Este trabalho apresenta a avaliação de estratégias de controle de corrente aplicadas ao rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em sistemas fotovoltaicos. Para isso, foi modelado um arranjo fotovoltaico conectado a um conversor boost, no qual foram implementados e analisados dois métodos de controle de corrente: histerese independente e proporcional-integral (PI). O desempenho dessas técnicas foi comparado ao método baseado em lógica *fuzzy*, empregado como referência devido à sua robustez. As simulações foram realizadas em *MATLAB* sob variações abruptas de irradiância, permitindo examinar parâmetros como erro em regime permanente, tempo de acomodação, comportamento dinâmico e estabilidade. Os resultados indicaram que o MPPT por histerese independente apresentou as respostas mais rápidas, porém com maior *ripple* de corrente devido à frequência de chaveamento variável. O controlador PI mostrou operação mais estável, com baixa ondulação e boa regulação de tensão, embora com tempo de resposta maior. Em comparação, o método *fuzzy* apresentou comportamento suave e robusto, mas com maior erro de potência em estado estacionário. De modo geral, os controladores por histerese e PI demonstraram capacidade eficaz de rastrear o ponto de máxima potência, sendo alternativas competitivas frente ao controlador *fuzzy*, cada uma com vantagens específicas que podem orientar sua aplicação prática em sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos; MPPT; controle de corrente; histerese; controle PI; lógica *fuzzy*.

ABSTRACT

This work presents the evaluation of current-control strategies applied to maximum power point tracking (MPPT) in photovoltaic systems. A photovoltaic array connected to a boost converter was modeled, in which two current-control methods—independent hysteresis and proportional–integral (PI)—were implemented and analyzed. The performance of these techniques was compared with a *ripple* logic-based method, used as a reference due to its robustness. Simulations were carried out in MATLAB under abrupt irradiance variations, enabling the assessment of steady-state error, settling time, dynamic response, and electrical stability. The results showed that the hysteresis-based MPPT provided the fastest response, though with increased current ripple due to its variable switching frequency. The PI controller exhibited more stable operation, with reduced ripple and adequate voltage regulation, despite a slower transient response. In comparison, the fuzzy method demonstrated smooth and robust behavior but presented a higher steady-state power error. Overall, the hysteresis and PI controllers effectively tracked the maximum power point and proved to be competitive alternatives to the fuzzy controller, each offering specific advantages that may guide practical applications in photovoltaic systems.

Keywords: photovoltaic systems; MPPT; current control; hysteresis control; PI control; fuzzy logic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	17
Figura 2 – Sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	18
Figura 3 – Sistema fotovoltaico híbrido	19
Figura 4 – Estrutura simplificada de uma célula fotovoltaica	20
Figura 5 – Principais tipos de células fotovoltaicas: (a) monocristalina, (b) poli- cristalina e (c) filmes finos	20
Figura 6 – Modelo equivalente de diodo único de uma célula fotovoltaica	22
Figura 7 – Modelo de circuito equivalente do módulo fotovoltaico	23
Figura 8 – Circuito equivalente do conversor boost conectado ao sistema FV	26
Figura 9 – Curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico	29
Figura 10 – Esquemático de um controlador PI	31
Figura 11 – Esquemático de um controlador por lógica <i>fuzzy</i>	33
Figura 12 – Curvas P–V do arranjo FV a 25 °C	35
Figura 13 – Diagrama de sistema FV com conversor CC–CC e MPPT	36
Figura 14 – Relação entre tensão de máxima potência (V_{MPP}) e irradiância (G)	37
Figura 15 – Esquemático do controlador MPPT por histerese independente	38
Figura 16 – Esquemático do controlador MPPT PI	39
Figura 17 – Esquemático do controlador MPPT baseado em lógica <i>fuzzy</i>	40
Figura 18 – Função de saída do controlador MPPT <i>fuzzy</i>	41
Figura 19 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do controlador <i>fuzzy</i> : (a) variação de potência ΔP e (b) variação de corrente ΔI	41
Figura 20 – Potência extraída utilizando o MPPT por histerese independente	44
Figura 21 – Corrente do indutor (i_L) utilizando o MPPT por histerese independente	44
Figura 22 – Tensão na carga (V_o) utilizando o MPPT por histerese independente	45
Figura 23 – Potência extraída utilizando o MPPT por controle PI	45
Figura 24 – Corrente do indutor (i_L) utilizando o MPPT por controle PI	46
Figura 25 – Tensão na carga (V_o) utilizando o MPPT por controle PI	46
Figura 26 – Potência extraída utilizando o MPPT por lógica <i>fuzzy</i>	47
Figura 27 – Corrente do indutor (i_L) utilizando o MPPT por lógica <i>fuzzy</i>	48
Figura 28 – Tensão na carga (V_o) utilizando o MPPT por lógica <i>fuzzy</i>	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações elétricas do módulo Kyocera KC130GT sob condições padrão de teste	34
Tabela 2 – Parâmetros elétricos adotados para o dimensionamento do conversor boost	35
Tabela 3 – Base de regras <i>fuzzy</i> adotada no controlador MPPT	42
Tabela 4 – Variação da irradiância com o tempo	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
FV	Fotovoltaico
FLC	<i>Fuzzy Logic Controller</i> (controlador por lógica <i>fuzzy</i>)
GSTC	<i>Global Standard Test Conditions</i> (condições globais padrão de teste)
I–V	Curva Corrente–Tensão
INC	<i>Incremental Conductance</i> (condutância incremental)
IMPP	Corrente no Ponto de Máxima Potência
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (rastreamento do ponto de máxima potência)
P&O	<i>Perturb and Observe</i> (perturbação e observação)
PI	Proporcional–Integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
TSTC	<i>Temperature Standard Test Conditions</i> (condições padrão de temperatura de teste)
VMPP	Tensão no Ponto de Máxima Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Energia solar fotovoltaica	16
2.2	Topologias de sistemas fotovoltaicos	17
2.2.1	Sistemas conectados à rede (<i>on-grid</i>)	17
2.2.2	Sistemas isolados da rede (<i>off-grid</i>)	17
2.2.3	Sistemas híbridos	18
2.3	Célula fotovoltaica	19
2.3.1	Modelo matemático da célula fotovoltaica	21
2.3.2	Modelo matemático do módulo fotovoltaico	23
2.3.3	Parâmetros externos que afetam as características elétricas	24
2.4	Conversor CC–CC boost	25
2.5	Rastreamento do ponto de máxima potência	28
2.5.1	Controle por histerese independente	29
2.5.2	Controle proporcional–integral	30
2.5.3	Controle por lógica <i>fuzzy</i>	31
3	METODOLOGIA	34
3.1	Configuração do arranjo fotovoltaico	34
3.2	Dimensionamento dos componentes do conversor boost	35
3.3	Implementação das técnicas MPPT	37
3.3.1	Controle por histerese independente	37
3.3.2	Implementação do controle Proporcional-Integral	38
3.3.3	Controle por lógica <i>fuzzy</i>	40
4	RESULTADOS	43
4.1	MPPT por histerese independente	43
4.2	MPPT baseado em controle PI	45
4.3	MPPT baseado em lógica <i>fuzzy</i>	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	Referências	50

1 INTRODUÇÃO

A transição energética global tem impulsionado a busca por fontes de energia renováveis capazes de reduzir os impactos ambientais e aumentar a eficiência na conversão de energia. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica (FV) tem se destacado como uma das alternativas mais promissoras, por ser uma fonte limpa, abundante e de baixo custo operacional (KISHORE; KUMAR; IPPILI, 2025).

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2025), a geração mundial de energia solar ultrapassou 1.600 TWh em 2023, representando um crescimento de 25% em relação ao ano anterior. No Brasil, a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2025) aponta que a capacidade instalada atingiu 60 GW, o equivalente a aproximadamente 23% da matriz elétrica nacional. Esse avanço reflete a consolidação da energia solar como uma das principais fontes da transição energética, contribuindo diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o fortalecimento da sustentabilidade ambiental.

Apesar de suas vantagens, os sistemas fotovoltaicos apresentam comportamento elétrico não linear, caracterizado pela relação não proporcional entre corrente e tensão em diferentes condições de operação, o que os torna sensíveis às variações de irradiância solar e temperatura. Essas condições alteram constantemente as curvas características de corrente e tensão, deslocando o ponto de máxima potência do arranjo. Para garantir o máximo aproveitamento da energia gerada, utilizam-se técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT), responsáveis por ajustar dinamicamente o ponto de operação do sistema para extrair a potência máxima disponível (KARAMI; MOUBAYED; OUTBIB, 2017).

As técnicas de MPPT podem ser classificadas em dois grandes grupos: as *off-line*, que utilizam medições externas de temperatura e irradiância combinadas a modelos pré-definidos; e as *on-line*, que dependem exclusivamente de variáveis elétricas, como corrente e tensão do módulo (CAVALCANTI; OLIVEIRA; AZEVEDO, 2006). Independentemente da abordagem, um bom algoritmo de MPPT deve garantir rápida resposta dinâmica, baixo erro em regime permanente, alta eficiência e robustez diante de perturbações (XIAO; DUNFORD, 2004).

Entre as estratégias de rastreamento, destacam-se as técnicas baseadas em controle de corrente, amplamente estudadas por aliarem simplicidade, precisão e boa resposta dinâmica. O controle por histerese independente é reconhecido por sua robustez e alta velocidade de resposta, sendo capaz de ajustar rapidamente o ponto de operação do conversor frente a variações súbitas de irradiância (NGUYEN-VAN; ABE; TANAKA, 2018;

GHAZALI; HASSAN; RAHMAN, 2021). O controle proporcional–integral (PI), por sua vez, apresenta baixo erro em regime permanente e facilidade de implementação, sendo amplamente aplicado em conversores CC–CC e sistemas de rastreamento de potência máxima (ELKHATEEB; ELSAYED, 2020; RAJ; PRAVEEN, 2022a).

Além dessas abordagens, as técnicas *on-line* baseadas em inteligência artificial vêm ganhando destaque pela capacidade de lidar com não linearidades e adaptação a variações ambientais sem exigir modelagens matemáticas detalhadas. Entre elas, o controle por lógica *fuzzy* se destaca pela robustez, estabilidade e flexibilidade operacional, características que o tornam adequado para aplicações em sistemas fotovoltaicos sujeitos a condições variáveis de irradiância e temperatura (HAI; LEE; CHOI, 2022; ALZATE; GIRALDO; CASTRO, 2023).

Neste trabalho, o desempenho de duas técnicas de rastreamento baseadas em controle de corrente — histerese independente e proporcional–integral — é comparado ao de uma técnica *on-line* baseada em inteligência artificial, o controle *fuzzy*. O estudo visa analisar o comportamento dinâmico, a estabilidade e a eficiência energética de cada método sob diferentes condições de operação, buscando identificar suas vantagens, limitações e potencial de aplicação em sistemas fotovoltaicos conectados a conversores CC–CC.

A relevância deste estudo está associada à necessidade de aprimorar o desempenho e a confiabilidade de sistemas fotovoltaicos por meio de estratégias de controle que conciliem simplicidade de implementação e robustez operacional. A comparação entre técnicas de natureza distinta fornece subsídios para o desenvolvimento de soluções de controle mais eficientes, capazes de operar de forma estável e otimizada em cenários de variação ambiental, contribuindo para o avanço das pesquisas em conversão de energia renovável.

1.1 Justificativa

O crescente uso de sistemas fotovoltaicos no Brasil e no mundo reforça a necessidade de métodos eficientes para extrair a máxima potência dos módulos solares, especialmente diante das variações de irradiância e temperatura que afetam diretamente o desempenho desses sistemas. Nesse contexto, técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência desempenham papel essencial para garantir maior eficiência energética e melhor aproveitamento da geração fotovoltaica.

Entre os diversos métodos existentes, os controladores baseados em corrente — como o controle por histerese independente e o proporcional–integral — destacam-se pela simplicidade de implementação e pelo desempenho satisfatório frente às dinâmicas do conversor CC–CC. Contudo, estudos comparativos envolvendo essas técnicas e estratégias mais robustas, como o MPPT baseado em lógica *fuzzy*, ainda são limitados, o que evidencia uma lacuna relevante na literatura.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pela necessidade de analisar e comparar diferentes estratégias de controle de corrente aplicadas ao MPPT, considerando não apenas o rastreamento da potência máxima, mas também o comportamento dinâmico e o impacto da frequência de chaveamento sobre o conversor. A comparação com o método *fuzzy* possibilita uma visão mais ampla sobre as vantagens e limitações de soluções clássicas frente a técnicas de inteligência computacional.

Assim, a pesquisa contribui para o aprimoramento de estratégias de controle em sistemas fotovoltaicos, oferecendo subsídios para aplicações práticas em laboratório, projetos didáticos e futuras implementações em sistemas conectados à rede ou autônomos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar comparativamente o desempenho das técnicas de controle de corrente por histerese independente, proporcional–integral e lógica *fuzzy* aplicadas ao rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre sistemas fotovoltaicos, conversores CC–CC e estratégias de MPPT baseadas em controle de corrente;
- Descrever os modelos matemáticos e computacionais correspondentes aos métodos de histerese independente, controle proporcional–integral e lógica *fuzzy*;
- Simular o comportamento de cada técnica sob diferentes perfis de irradiância, avaliando parâmetros como precisão, tempo de resposta e estabilidade;
- Comparar o desempenho das três abordagens quanto à eficiência no rastreamento da potência máxima, robustez e complexidade de implementação;
- Apresentar recomendações técnicas que possam orientar futuras aplicações práticas das estratégias analisadas em sistemas fotovoltaicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da radiação solar em energia elétrica, realizada por meio de células fotovoltaicas, dispositivos semicondutores que transformam a energia luminosa em corrente elétrica contínua. Posteriormente, essa energia é convertida em corrente alternada por inversores eletrônicos, permitindo sua utilização em sistemas elétricos residenciais, comerciais e industriais (VILLALVA; GAZOLI, 2021).

O princípio de funcionamento das células fotovoltaicas baseia-se no efeito fotovoltaico, fenômeno físico descoberto em 1839 pelo cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel. Em seus experimentos, Becquerel observou que determinados materiais, quando expostos à luz solar, produziam uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos imersos em uma solução condutora. Esse fenômeno foi o primeiro registro da conversão direta da energia luminosa em energia elétrica (CRESESB, 2014).

Décadas mais tarde, em 1883, o inventor Charles Fritts construiu a primeira célula fotovoltaica funcional, composta por uma fina camada de ouro sobre selênio. Apesar de sua eficiência inferior a 1%, o experimento representou um marco inicial no uso prático do efeito fotovoltaico. Já em 1905, Albert Einstein contribuiu para a compreensão teórica do fenômeno ao descrever o efeito fotoelétrico, explicando o comportamento dos elétrons sob incidência luminosa e consolidando a base científica das atuais tecnologias fotovoltaicas (GREEN, 2020).

O desenvolvimento moderno da energia solar fotovoltaica teve início em 1954, com a criação da primeira célula solar de silício cristalino pelos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, que alcançou eficiência de cerca de 6%. Desde então, melhorias na fabricação e nos materiais semicondutores resultaram em eficiências comerciais superiores a 22%, enquanto as células laboratoriais já atingem valores acima de 26% (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

Atualmente, a tecnologia fotovoltaica é amplamente utilizada em diferentes tipos de sistemas, os quais podem ser conectados à rede (*on-grid*), isolados (*off-grid*) ou híbridos. Cada configuração possui características específicas quanto à forma de geração, armazenamento e integração com a rede elétrica, conforme apresentado na próxima seção.

2.2 Topologias de sistemas fotovoltaicos

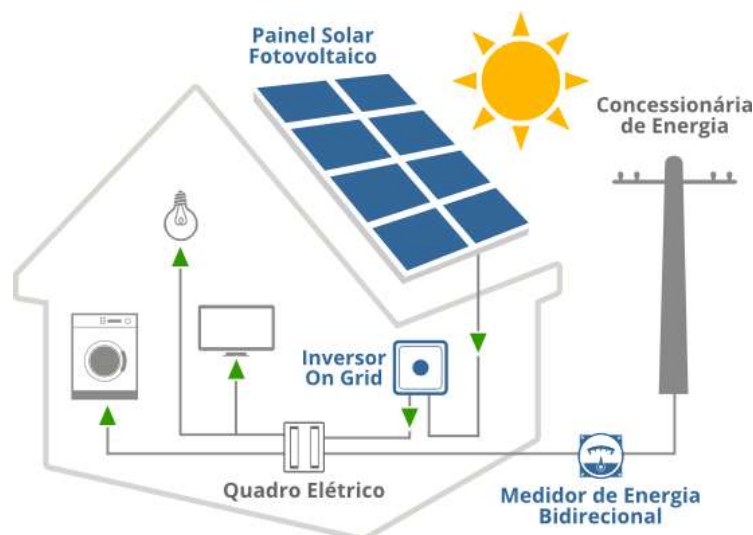
Os sistemas fotovoltaicos são classificados de acordo com sua forma de operação e conexão com a rede elétrica, sendo geralmente divididos em três categorias: *on-grid*, *off-grid* e híbridos. Essa classificação é importante para definir a estrutura do sistema, os equipamentos necessários e o modo de gerenciamento da energia gerada (CRESESB, 2014; International Energy Agency, 2023).

2.2.1 Sistemas conectados à rede (*on-grid*)

Os sistemas *on-grid* operam em paralelo com a rede pública de energia elétrica. A energia gerada pelos módulos é convertida de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) por inversores sincronizados com a rede. O excedente de energia pode ser injetado na rede de distribuição, gerando créditos energéticos de acordo com a regulamentação vigente, conforme a Resolução Normativa nº 1.000/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2021).

Esses sistemas são amplamente empregados em áreas urbanas e comerciais devido à praticidade de instalação e ao baixo custo de manutenção. Por não exigirem o uso de baterias, apresentam alta eficiência e baixo impacto ambiental, além de contribuírem para a redução da demanda de energia da rede convencional. A configuração típica de um sistema fotovoltaico conectado à rede é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Sistema fotovoltaico *on-grid*



Fonte: (INSTITUTO SOLAR, 2019)

2.2.2 Sistemas isolados da rede (*off-grid*)

Os sistemas *off-grid* funcionam de forma independente da rede elétrica convencional. Nesse tipo de configuração, a energia gerada pelos painéis é armazenada em baterias por meio de controladores de carga, que regulam a tensão e a corrente elétrica, evitando

sobrecargas e descargas profundas. Durante períodos sem radiação solar, a energia armazenada é utilizada para alimentar as cargas conectadas ao sistema (CRESESB, 2014).

Esses sistemas são amplamente aplicados em regiões remotas, comunidades rurais, sistemas de bombeamento de água, telecomunicações e iluminação pública em locais sem acesso à rede elétrica. Apesar do custo inicial mais elevado, por exigirem baterias e controladores, eles proporcionam autonomia energética e confiabilidade em locais isolados. A Figura 2 exibe a estrutura básica de um sistema fotovoltaico isolado da rede.

Figura 2 – Sistema fotovoltaico *off-grid*



Fonte: (INSTITUTO SOLAR, 2019)

2.2.3 Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos combinam as características dos sistemas *on-grid* e *off-grid*, integrando painéis solares, baterias e conexão com a rede elétrica ou geradores auxiliares. Nessa configuração, a energia pode ser utilizada diretamente, armazenada ou injetada na rede, conforme a demanda e a disponibilidade de geração.

A principal vantagem dos sistemas híbridos é a autonomia energética, pois mesmo em situações de falha da rede, o sistema continua operando por meio do armazenamento. Essa topologia é amplamente utilizada em aplicações residenciais, industriais e em sistemas de microrredes inteligentes, que integram diferentes fontes de energia e estratégias de controle (International Energy Agency, 2023). A configuração de um sistema fotovoltaico híbrido é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Sistema fotovoltaico híbrido



Fonte: (OCA ENERGIA, 2025)

A escolha entre as diferentes topologias depende de fatores como a disponibilidade de infraestrutura elétrica local, o perfil de consumo de energia, os custos de instalação e manutenção, e a necessidade de autonomia do sistema.

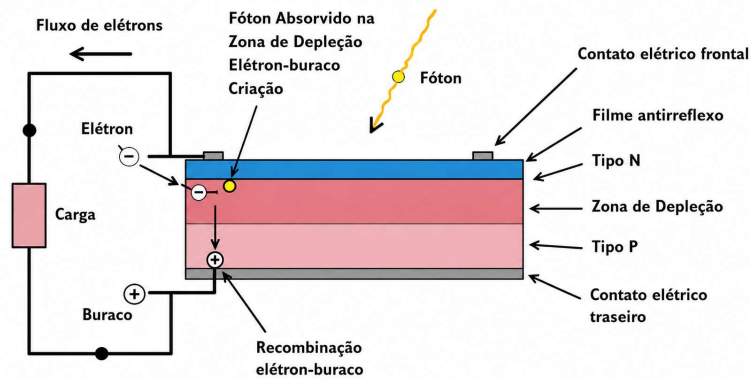
2.3 Célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é o componente elementar dos sistemas solares e tem como função realizar a conversão direta da energia luminosa em energia elétrica. A Figura 4 exibe a estrutura simplificada de uma célula fotovoltaica, formada por duas camadas finas de material semicondutor, dopadas de maneira a estabelecer uma junção do tipo p-n (AL-EZZI; ANSARI, 2022).

A camada tipo **p** contém impurezas com deficiência de elétrons (portadores positivos), enquanto a camada tipo **n** possui excesso de elétrons livres (portadores negativos). Quando ambas as camadas são unidas, forma-se uma região de depleção, onde ocorre o equilíbrio entre os portadores de carga (RAZYKOV et al., 2022).

Quando a luz solar incide, fótons com energia igual ou superior à faixa proibida (*band gap*) do material liberam elétrons da banda de valência para a banda de condução. O campo elétrico interno na junção p-n separa os portadores — conduzindo elétrons para a camada tipo n e lacunas para a tipo p. Quando a célula está conectada a um circuito externo, esses elétrons fluem e geram corrente elétrica (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014; GREEN, 2020).

Figura 4 – Estrutura simplificada de uma célula fotovoltaica

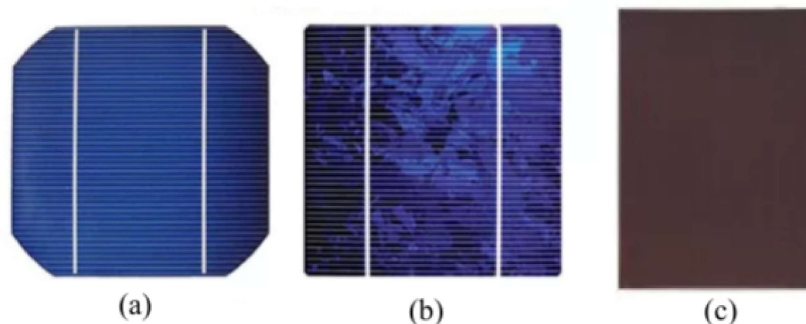


Fonte: (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009)

O desempenho de uma célula solar depende de diversos fatores, como o tipo de material semiconductor, as propriedades ópticas, as características elétricas e as condições ambientais de operação. Entre os principais materiais empregados destacam-se o silício monocristalino, o silício policristalino e os filmes finos, cada um apresentando vantagens e limitações quanto à eficiência e ao custo de fabricação (National Renewable Energy Laboratory, 2023; International Energy Agency, 2023).

As diferentes tecnologias de células fotovoltaicas podem ser observadas na Figura 5, em que são apresentados os modelos de silício monocristalino (a), silício policristalino (b) e filmes finos (c). As células de silício monocristalino apresentam maior eficiência (até 26%) e vida útil superior, sendo amplamente utilizadas em sistemas residenciais e comerciais. Já as células policristalinas possuem custo mais baixo e eficiência em torno de 18%. Por sua vez, as tecnologias de filmes finos, como telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), destacam-se pela flexibilidade e leveza, embora apresentem eficiências inferiores em comparação às tecnologias cristalinas (GREEN et al., 2020).

Figura 5 – Principais tipos de células fotovoltaicas: (a) monocristalina, (b) policristalina e (c) filmes finos



Fonte: Adaptado de Sunflower Solar (2025)

Além das tecnologias convencionais, pesquisas recentes têm destacado as células

fotovoltaicas de perovskita, que apresentam elevado potencial devido à alta eficiência de conversão, baixo custo de fabricação e possibilidade de aplicação em dispositivos flexíveis. As perovskitas são materiais semicondutores com estrutura cristalina do tipo ABX_3 , capazes de apresentar elevada absorção da radiação solar e excelente transporte de carga (YANG et al., 2024).

Nos últimos anos, as células solares de perovskita passaram por avanços expressivos em eficiência. Atualmente, dispositivos de junção simples já ultrapassam 27% de eficiência em laboratório, enquanto células tandem silício–perovskita atingiram valores superiores a 34%, estabelecendo novos recordes mundiais certificados pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) (LONGI, 2025; National Renewable Energy Laboratory, 2026). Em 2025, a empresa LONGi alcançou eficiência de 34,85% em uma célula tandem silício–perovskita de dois terminais, demonstrando o elevado potencial dessa tecnologia para aplicações fotovoltaicas de próxima geração.

As estruturas tandem combinam materiais semicondutores com diferentes bandas proibidas (*band gaps*), permitindo melhor aproveitamento do espectro solar e redução das perdas por termalização. Dessa forma, as células de perovskita surgem como uma alternativa promissora para superar os limites teóricos das células convencionais de silício monocristalino (GREEN, 2020).

Apesar dos avanços recentes, ainda existem desafios relacionados à estabilidade térmica, degradação por umidade e durabilidade operacional das perovskitas. Além disso, determinadas composições utilizam chumbo em sua estrutura química, o que motiva pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais menos tóxicos e mais estáveis para aplicações comerciais em larga escala (AFRE; PUGLIESE, 2024).

O comportamento elétrico da célula fotovoltaica pode ser descrito por meio de um modelo elétrico equivalente, que representa a relação entre a corrente gerada e a tensão nos terminais do dispositivo. Esse modelo será detalhado na Seção 2.3.1, incluindo suas principais equações e parâmetros característicos.

2.3.1 Modelo matemático da célula fotovoltaica

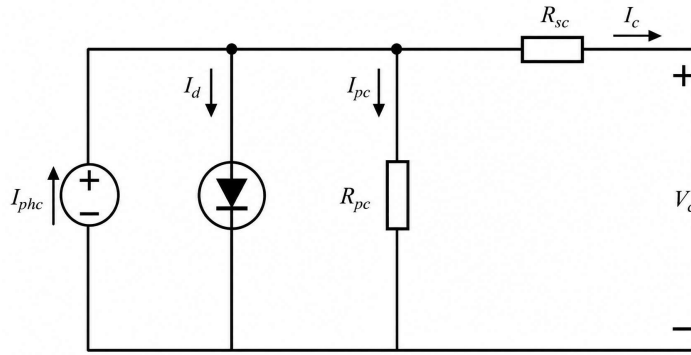
A relação entre tensão e corrente elétrica é uma das principais características de uma célula ou módulo fotovoltaico, pois descreve o comportamento elétrico do dispositivo sob diferentes condições de operação. A modelagem elétrica tem como objetivo representar matematicamente a curva característica $I-V$ e compreender o funcionamento interno da célula a partir de um circuito equivalente.

Essa modelagem permite prever o desempenho do dispositivo diante de variações de irradiância, temperatura e carga, sendo essencial para simulações, análise de desempenho e dimensionamento de sistemas solares. Diversos modelos são apresentados na literatura

— incluindo o modelo de dois diodos e abordagens baseadas em efeitos avançados de recombinação — porém, o modelo de diodo único destaca-se por sua ampla aceitação em estudos acadêmicos e aplicações práticas (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009; GREEN et al., 2020).

O modelo de diodo único parte do pressuposto de que um único diodo é suficiente para representar o comportamento da junção P–N, obtendo um equilíbrio eficiente entre simplicidade e precisão (ZHANG et al., 2022). O circuito equivalente é composto por uma fonte de corrente fotogerada I_{phc} , uma resistência paralela R_{pc} , responsável pelas perdas por recombinação e fugas internas, uma resistência série R_{sc} , que representa as perdas ôhmicas dos contatos e trilhas metálicas, e um diodo em paralelo, que descreve o comportamento característico da junção semicondutora. A Figura 6 ilustra o circuito equivalente do modelo de diodo único utilizado na representação elétrica da célula fotovoltaica.

Figura 6 – Modelo equivalente de diodo único de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2022)

Aplicando a Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC) ao circuito equivalente, obtém-se a relação fundamental apresentada na Equação 1:

$$I_c = I_{phc} - I_d - I_{pc} \quad (1)$$

em que I_c é a corrente de saída da célula, I_{phc} é a corrente fotogerada, I_d é a corrente do diodo e I_{pc} é a corrente que flui através da resistência paralela.

A corrente do diodo é descrita pela Equação 2, correspondente à equação exponencial característica da junção semicondutora:

$$I_d = I_{0c} \left[e^{\frac{V_c + I_c R_{sc}}{n V_T}} - 1 \right] \quad (2)$$

em que I_{0c} é a corrente de saturação reversa, V_c é a tensão aplicada nos terminais da célula, n é o fator de idealidade do diodo (1 a 2) e V_T é a tensão térmica, definida pela Equação 3:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

sendo k a constante de Boltzmann, T a temperatura da célula em Kelvin e q a carga elementar do elétron.

Por fim, a corrente associada à resistência paralela é dada pela Equação 4:

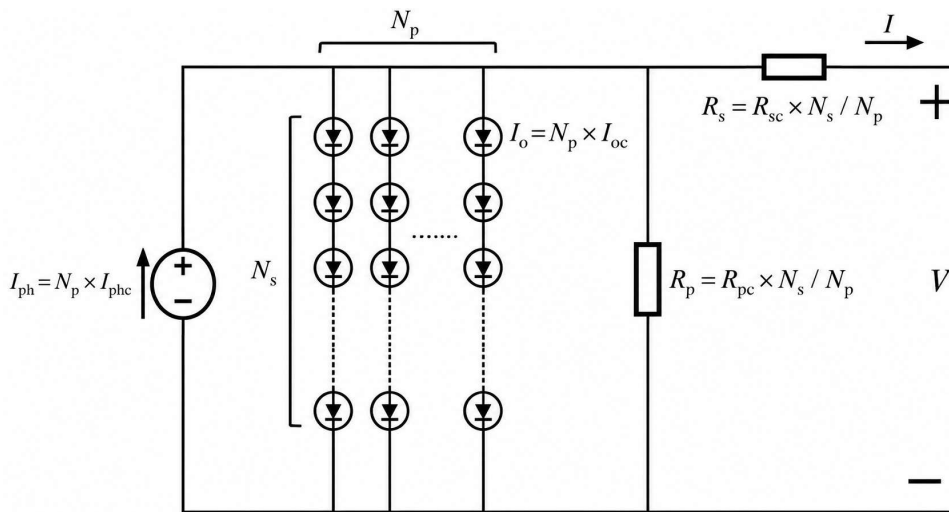
$$I_{pc} = \frac{V_c + I_c R_{sc}}{R_{pc}} \quad (4)$$

Esse modelo de diodo único é amplamente empregado em softwares de simulação, algoritmos de rastreamento de máxima potência, estudos de desempenho e modelagem de módulos fotovoltaicos, constituindo uma base sólida e precisa para análises em engenharia solar.

2.3.2 Modelo matemático do módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é formado pelo arranjo de diversas células solares conectadas em série e/ou em paralelo, de modo a atingir níveis de tensão e corrente adequados para aplicações práticas. Nesse arranjo, N_s representa o número de células conectadas em série, enquanto N_p indica o número de ramos conectados em paralelo. O circuito equivalente do módulo, derivado diretamente do modelo de diodo único aplicado à célula, é apresentado na Figura 7, onde cada parâmetro elétrico é ajustado conforme a quantidade de células no arranjo.

Figura 7 – Modelo de circuito equivalente do módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2022)

A relação corrente–tensão (I – V) de um módulo fotovoltaico, considerando o modelo de diodo único, é expressa pela Equação 5:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{nN_sV_T}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (5)$$

Em que:

- I_{ph} é a corrente fotogerada do módulo, sendo $I_{ph} = N_p \times I_{phc}$;
- I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, dada por $I_0 = N_p \times I_{0c}$;
- R_s é a resistência série equivalente do módulo, obtida por $R_s = R_{sc} \times \frac{N_s}{N_p}$;
- R_p é a resistência paralela equivalente, definida como $R_p = R_{pc} \times \frac{N_s}{N_p}$;
- n é o fator de idealidade;
- V_T é a tensão térmica.

Esse modelo relaciona a estrutura em série e paralelo com o comportamento elétrico global do módulo, permitindo integrar efeitos físicos observados em células individuais — como perdas ôhmicas, recombinação e variações de temperatura. Dessa forma, a equação I – V em nível de módulo se torna fundamental para prever o desempenho de arranjos fotovoltaicos maiores e para realizar simulações precisas em sistemas solares conectados à rede ou isolados.

2.3.3 Parâmetros externos que afetam as características elétricas

O comportamento elétrico de módulos fotovoltaicos depende fortemente das condições ambientais de operação, sendo a irradiância solar e a temperatura da célula os fatores mais influentes. Essas grandezas modificam o formato das curvas características corrente–tensão (I – V) e potência–tensão (P – V), alterando diretamente o ponto de máxima potência (MPP) e, conseqüentemente, a energia entregue pelo arranjo fotovoltaico. Conforme destacado pelo (CRESESB, 2014), variações na intensidade e no espectro da radiação, mesmo próximas a 1000 W/m², já são suficientes para provocar alterações significativas no comportamento elétrico da célula.

Com base nos parâmetros definidos em condições padrão de teste (STC) — temperatura da célula de 25°C e irradiância de 1000 W/m² — é possível ajustar o modelo fotovoltaico para outras condições de operação por meio das equações de transformação propostas por (SOTO; KLEIN; BECKMAN, 2006). Tais equações são amplamente adotadas em estudos recentes (MA; YANG; LU, 2019; ALY; AHZI; BARTH, 2019; ZHANG; SUN; LI, 2020; ZHANG; WANG; XU, 2022; KUMAR et al., 2024; WANG; LIU, 2024; ELSAFI et al., 2025) e fornecem correções essenciais para representar adequadamente o comportamento elétrico do módulo.

A fotocorrente corrigida para irradiância e temperatura é expressa pela Equação 6:

$$I_{ph} = [I_{ph,STC} + \alpha_{Isc}(T - T_{STC})] \frac{G}{G_{STC}} \quad (6)$$

A corrente de saturação do diodo, que aumenta com a temperatura, é atualizada conforme a Equação 7:

$$I_0 = I_{0,STC} \left(\frac{T}{T_{STC}} \right)^3 e^{\left[\frac{q}{k} \left(\frac{E_{g,STC}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \right) \right]} \quad (7)$$

As resistências e o fator de idealidade são ajustados de acordo com a Equação 8:

$$R_s = R_{s,STC}, \quad R_p = R_{p,STC} \left(\frac{G_{STC}}{G} \right), \quad n = n_{STC} \quad (8)$$

A tensão térmica é definida pela Equação 9:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (9)$$

A variação da energia de gap com a temperatura segue a Equação 10:

$$\frac{E_g}{E_{g,STC}} = 1 - C(T - T_{ref}) \quad (10)$$

Para módulos de silício cristalino, adota-se $E_{g,STC} = 1.12$ eV e $C = 2.677 \times 10^{-4}$ eV/K. Já para células de silício amorfo de junção tripla, considera-se $E_{g,STC} = 1.6$ eV, conforme apresentado por (SOTO; KLEIN; BECKMAN, 2006). Esses parâmetros são essenciais para uma representação adequada das propriedades físico-químicas do semicondutor e permitem precisão na modelagem em diferentes condições ambientais.

2.4 Conversor CC–CC boost

Os conversores CC–CC são amplamente utilizados em sistemas fotovoltaicos por sua capacidade de adaptar os níveis de tensão contínua entre diferentes estágios do sistema. O arranjo fotovoltaico, em condições típicas de operação, fornece energia em níveis de tensão relativamente baixos, o que pode representar uma limitação em aplicações que exigem valores mais elevados para alimentação de cargas ou integração à rede elétrica. Para contornar essa limitação, os conversores CC–CC permitem elevar a tensão de saída, promovendo maior flexibilidade e eficiência na conversão de energia (RAJ; PRAVEEN, 2022c; MOHAMMAD et al., 2025).

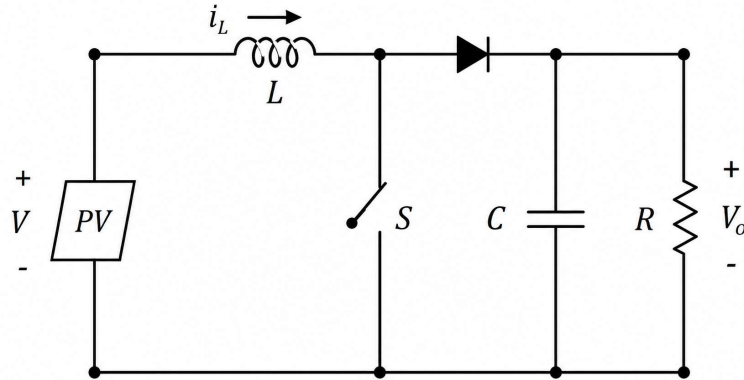
Entre as diferentes topologias de conversores, o boost se destaca por sua simplicidade construtiva, elevado rendimento e ampla aplicação em sistemas fotovoltaicos, especialmente

quando associado a técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Sua função é elevar a tensão de entrada V proveniente do módulo fotovoltaico para um nível superior de tensão V_o , adequado ao barramento CC ou ao estágio inversor (RAJ; PRAVEEN, 2022a; SUTIKNO et al., 2023).

A Figura 8 exibe o circuito equivalente do conversor boost conectado ao sistema fotovoltaico, composto por um indutor L , uma chave semicondutora S , um diodo D , um capacitor de saída C e uma resistência de carga R . O princípio de funcionamento é baseado em dois estágios fundamentais:

- **Estágio de carga do indutor** ($S = 1$): o indutor armazena energia enquanto o diodo é bloqueado.
- **Estágio de descarga do indutor** ($S = 0$): o indutor transfere energia para a carga e para o capacitor.

Figura 8 – Circuito equivalente do conversor boost conectado ao sistema FV



Fonte: Autoria própria (2025)

Para representar matematicamente o comportamento dinâmico do conversor, considera-se o regime de condução contínua (CCM), no qual a corrente no indutor i_L não se anula durante o chaveamento (RAJ; PRAVEEN, 2022b; NOMAN et al., 2023). A seguir, desenvolvem-se as equações do sistema para cada estado da chave S .

Modo 1 – Chave fechada ($S = 1$)

Nesse modo, a chave semicondutora conduz e o diodo está bloqueado. O indutor conecta-se diretamente à fonte fotovoltaica, armazenando energia magnética. As equações são obtidas pelas Leis de Kirchhoff.

Indutor:

$$v_L = V \quad \Rightarrow \quad L \frac{di_L}{dt} = V \quad (11)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V}{L} \quad (12)$$

Capacitor:

$$i_C = -\frac{V_o}{R} \quad (13)$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{R} \quad (14)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad (15)$$

Modelo em espaço de estados (modo ON):

$$\dot{x} = A_{on}x + B_{on}V \quad (16)$$

$$A_{on} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad B_{on} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Modo 2 – Chave aberta ($S = 0$)

Ao desligar a chave, o campo magnético acumulado no indutor colapsa, gerando uma tensão oposta que força o diodo a conduzir. A energia armazenada é então transferida para a carga e para o capacitor.

Indutor:

$$v_L = V - V_o \quad (17)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V - V_o \quad (18)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V - V_o}{L} \quad (19)$$

Capacitor:

$$i_C = i_L - \frac{V_o}{R} \quad (20)$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = i_L - \frac{V_o}{R} \quad (21)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \quad (22)$$

Modelo em espaço de estados (modo OFF):

$$A_{off} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad B_{off} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Os modos ON e OFF podem ser combinados em uma única formulação utilizando a variável lógica S , que assume:

$$S = \begin{cases} 1, & \text{chave fechada} \\ 0, & \text{chave aberta} \end{cases}$$

Assim, o modelo completo do conversor boost é dado por:

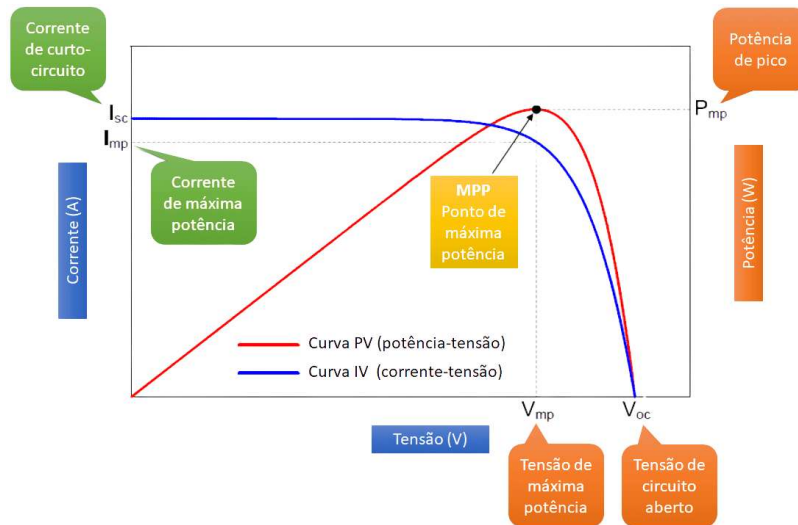
$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{S-1}{L_1} \\ \frac{1-S}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V \quad (23)$$

2.5 Rastreamento do ponto de máxima potência

A geração fotovoltaica apresenta características inerentes que dificultam sua operação em condições ideais, como a natureza intermitente da irradiância, a sensibilidade térmica dos módulos e a variação constante da curva característica $I \times V$ ao longo do dia. Essas limitações tornam impossível manter a extração de energia em seu valor máximo sem a atuação de um mecanismo de controle adequado. Nesse contexto, o *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) emerge como um elemento central em sistemas fotovoltaicos, garantindo que o módulo opere continuamente no ponto de maior transferência de energia (HEGAZY; SHOKAIR; SAAD, 2023; JIN et al., 2017).

Os MPPTs são compostos por duas partes fundamentais: um conversor CC–CC, responsável por ajustar eletricamente o ponto de operação do módulo, e um algoritmo de controle embarcado, encarregado de conduzir o sistema automaticamente ao ponto de máxima potência (VILLEGAS-MIER et al., 2021). Algoritmos clássicos como *Perturba e Observa*, *Condutância Incremental* e *Tensão Constante* são amplamente utilizados na literatura (GRUNER et al., 2023), embora apresentem limitações sob condições ambientais rápidas ou complexas.

A Figura 9 exibe a curva $I \times V$ típica de um módulo fotovoltaico, destacando o ponto de máxima potência. Observa-se que, para tensões inferiores ao MPP, a potência cresce com o aumento da tensão; acima desse ponto, a potência decresce devido à queda acentuada da corrente. O MPPT atua ajustando continuamente o ponto de operação do arranjo fotovoltaico ao longo dessa curva, deslocando-o até a região em que a extração de energia se torna máxima (SILVESTRE, 2024). Dessa forma, mesmo diante de variações de irradiância, temperatura ou sombreamento parcial, o controle assegura que o sistema opere com o melhor rendimento possível.

Figura 9 – Curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico

Fonte: (Canal Solar, 2019)

2.5.1 Controle por histerese independente

No controle por histerese independente, a corrente do indutor é monitorada continuamente e comparada a dois limites que definem a banda de histerese. Quando a corrente ultrapassa o limite superior, a chave do conversor é desligada; ao atingir o limite inferior, a chave é novamente acionada. Dessa forma, a comutação é determinada exclusivamente pela dinâmica da corrente, sem necessidade de moduladores externos ou sinais portadores.

Para aplicação em MPPT, o método utiliza uma corrente de referência associada ao ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico. A banda de histerese é centrada em torno dessa referência, forçando o conversor a ajustar o ponto de operação do módulo de modo que a corrente permaneça próxima do valor correspondente ao MPP.

A estrutura de controle permite resposta rápida frente a alterações de irradiância, pois a comutação ocorre imediatamente quando a corrente ultrapassa os limites definidos. Assim, o conversor acompanha de forma quase instantânea o deslocamento do ponto de máxima potência, mesmo sob condições ambientais variáveis. Tal característica é destacada na literatura como uma das principais vantagens do método, sobretudo em cenários com sombreamento intermitente ou variações rápidas de irradiância decorrentes do movimento de nuvens (NGUYEN-VAN; ABE; TANAKA, 2018).

Apesar do desempenho dinâmico superior, o método apresenta frequência de chaveamento variável, dependente da largura da banda de histerese e das condições de operação do arranjo. Essa característica pode aumentar o esforço sobre os semicondutores e exigir maior atenção no projeto dos filtros de saída. Ainda assim, a simplicidade de implementação e a elevada agilidade tornam o controle por histerese independente uma alternativa relevante para aplicações fotovoltaicas sujeitas a rápidas mudanças de irradiância.

2.5.2 Controle proporcional–integral

O controle proporcional–integral (PI) é amplamente utilizado em sistemas de eletrônica de potência devido à sua simplicidade, boa estabilidade e capacidade de eliminar erro em regime permanente. No contexto de sistemas fotovoltaicos, o controlador PI atua regulando a corrente do conversor de modo que o arranjo opere no ponto de máxima potência.

A estrutura do controlador PI é composta pelas ações proporcional e integral, cada uma responsável por uma característica específica da resposta dinâmica do sistema. A Figura 10 exibe o esquemático simplificado de um controlador PI aplicado em sistemas de controle.

A ação proporcional (P) atua de forma instantânea sobre o erro do sistema, produzindo uma saída proporcional à diferença entre o valor de referência e a variável medida. Sua principal função é acelerar a resposta dinâmica e reduzir rapidamente o erro. A ação proporcional pode ser representada pela Equação 24:

$$u_P(t) = K_P e(t) \quad (24)$$

em que $u_P(t)$ representa a ação proporcional do controlador, K_P é o ganho proporcional e $e(t)$ corresponde ao erro do sistema.

Entretanto, a utilização isolada da ação proporcional normalmente resulta em erro em regime permanente. Para eliminar esse desvio, emprega-se a ação integral (I), que acumula o erro ao longo do tempo e ajusta continuamente a saída do controlador. A ação integral é descrita pela Equação 25:

$$u_I(t) = K_I \int e(t) dt \quad (25)$$

em que $u_I(t)$ corresponde à ação integral do controlador e K_I representa o ganho integral.

A combinação das ações proporcional e integral resulta no controlador PI completo, cuja equação geral é apresentada na Equação 26:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (26)$$

em que $u(t)$ é o sinal de controle aplicado ao sistema.

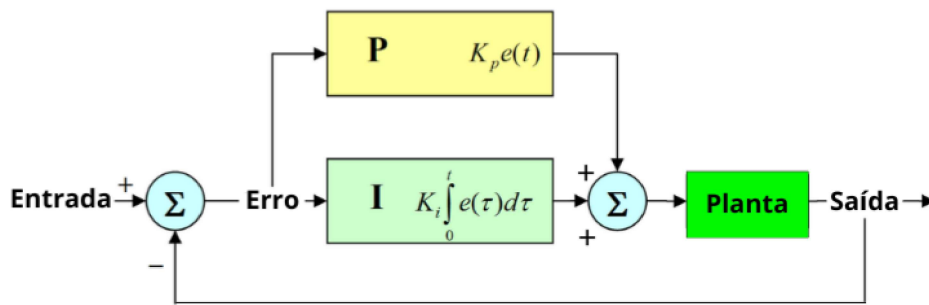
No método PI aplicado ao rastreamento do ponto de máxima potência, utiliza-se uma corrente de referência associada ao MPP, e o controlador calcula continuamente o erro entre essa referência e a corrente medida no indutor do conversor. A ação proporcional reduz

imediatamente esse erro, enquanto a ação integral corrige desvios persistentes, garantindo que o ponto de operação seja mantido próximo da condição de máxima potência ao longo do tempo.

A saída do controlador é utilizada para ajustar a razão cíclica do conversor CC–CC, modificando a tensão de operação do arranjo fotovoltaico. Esse mecanismo de atuação em malha fechada oferece resposta estável, com baixa oscilação e reduzido erro em regime permanente, além de permitir operação com frequência de chaveamento fixa, característica favorável ao dimensionamento dos componentes e ao controle das perdas de comutação.

Apesar de sua simplicidade, o desempenho do PI depende diretamente da escolha adequada de seus ganhos, que influenciam a rapidez da resposta, o amortecimento do sistema e a precisão no regime estacionário. Por esses motivos, o método é amplamente empregado em aplicações fotovoltaicas conectadas a conversores boost, especialmente quando se busca um equilíbrio entre desempenho dinâmico, estabilidade e facilidade de implementação.

Figura 10 – Esquemático de um controlador PI



Fonte: Autoria própria (2025)

2.5.3 Controle por lógica *fuzzy*

O Controlador por Lógica *Fuzzy* (*Fuzzy Logic Controller* – FLC) utiliza os princípios da lógica nebulosa, proposta originalmente por Lotfi Zadeh em 1965, para lidar com sistemas marcados por incertezas, não linearidades e variações dinâmicas (ZADEH, 1965). Diferentemente das abordagens de controle tradicionais, que operam com limites rigidamente definidos, a lógica *fuzzy* permite representar variáveis por meio de termos linguísticos, como “baixo”, “médio” ou “alto”, possibilitando um tratamento mais flexível de grandezas contínuas (COELHO; SCHMITZ; MARTINS, 2022).

Controladores *fuzzy* são amplamente empregados em aplicações de engenharia por não exigirem um modelo matemático preciso do sistema. Seu funcionamento baseia-se em um conjunto de regras heurísticas do tipo *se–então*, construídas a partir do conhecimento prévio do comportamento do processo. Essa característica torna o método especialmente

útil em sistemas cuja modelagem analítica é complexa ou insuficiente (SEYEDMAHMOUDIAN et al., 2016).

Nos sistemas fotovoltaicos, a lógica *fuzzy* tem sido aplicada como alternativa às técnicas convencionais de MPPT, como Perturba e Observa (P&O) e Condutância Incremental (INC). Métodos tradicionais tendem a apresentar limitações sob variações rápidas de irradiância ou em cenários de sombreamento parcial, enquanto o FLC se mostra mais robusto ao incorporar informações linguísticas sobre variações de potência ou corrente, ajustando a razão cíclica do conversor de forma adaptativa (YAP; SARIMUTHU; LIM, 2020). Além disso, o controlador *fuzzy* apresenta melhor desempenho em sistemas não lineares, reduzindo oscilações em torno do ponto de máxima potência e proporcionando maior rapidez na convergência do algoritmo MPPT.

O processo de controle *fuzzy* envolve três etapas principais, apresentadas na Figura 11: fuzzificação, inferência *fuzzy* e defuzzificação.

A fuzzificação é responsável por converter variáveis numéricas de entrada em variáveis linguísticas associadas a funções de pertinência. Nessa etapa, grandezas como erro e variação do erro são representadas por conjuntos fuzzy, permitindo interpretar o comportamento do sistema de maneira semelhante ao raciocínio humano. Cada variável passa a possuir diferentes graus de pertinência, variando entre 0 e 1.

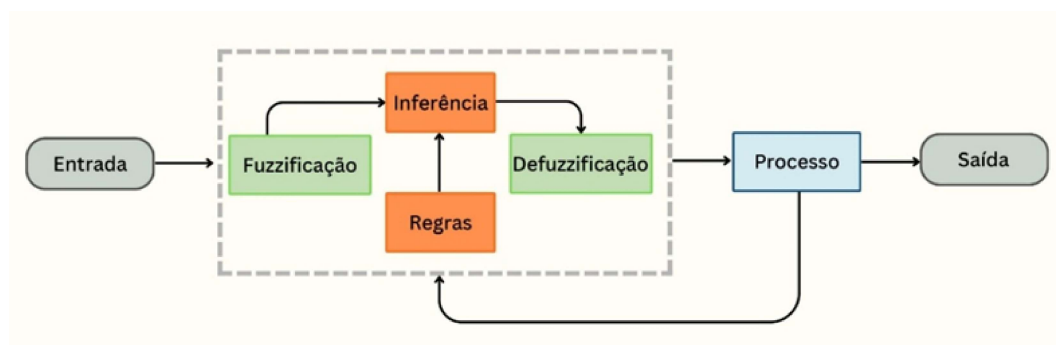
A etapa de inferência *fuzzy* corresponde ao núcleo do controlador, onde é aplicada a base de regras *fuzzy*. Essas regras possuem estrutura do tipo “SE–ENTÃO”, relacionando as condições de entrada às ações de controle desejadas. Por exemplo: “SE o erro é positivo grande E a variação do erro é pequena, ENTÃO aumentar moderadamente a razão cíclica”. O conjunto dessas regras define o comportamento dinâmico do controlador e permite adaptar a resposta do sistema às diferentes condições de operação.

Neste trabalho, utiliza-se o modelo de inferência de Mamdani, amplamente empregado em aplicações de controle *fuzzy* devido à sua simplicidade e facilidade de interpretação. O modelo Mamdani utiliza saídas *fuzzy* associadas a regras linguísticas, exigindo posteriormente uma etapa de defuzzificação para obtenção de um valor numérico de saída. Em comparação, o modelo Takagi–Sugeno emprega funções matemáticas nas saídas das regras, sendo mais adequado para aplicações que demandam maior capacidade analítica e implementação matemática simplificada.

A etapa final corresponde à defuzzificação, responsável por converter a saída *fuzzy* obtida no processo de inferência em um valor numérico aplicado ao sistema de controle. Entre os métodos mais utilizados destaca-se o método do centróide, no qual o valor final corresponde ao centro de gravidade do conjunto *fuzzy* resultante. Esse valor é então utilizado para ajustar a razão cíclica do conversor CC–CC, permitindo controlar o ponto de operação do sistema fotovoltaico.

A Figura 11 exibe um esquemático geral de um controlador *fuzzy*, destacando as etapas de fuzzificação, inferência baseada em regras e defuzzificação empregadas no processo de controle.

Figura 11 – Esquemático de um controlador por lógica *fuzzy*



Fonte: Autoria própria (2025)

3 METODOLOGIA

3.1 Configuração do arranjo fotovoltaico

O arranjo FV considerado neste estudo possui potência nominal de 5,8 kW, configurado a partir de sete ramais em paralelo, cada um composto por cinco módulos conectados em série. Essa configuração foi definida para atender à faixa de tensão exigida pelo conversor boost, assegurando equilíbrio entre eficiência de conversão e flexibilidade operacional.

Para compor o arranjo, adotou-se o módulo Kyocera KC130GT, amplamente empregado em estudos acadêmicos e aplicações de pequeno e médio porte devido à sua confiabilidade, disponibilidade de dados técnicos e desempenho consolidado em campo (TADJ et al., 2023; BARADIEH et al., 2024). As principais especificações elétricas, sob condições padrão de teste ($G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$, AM 1.5), são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações elétricas do módulo Kyocera KC130GT sob condições padrão de teste

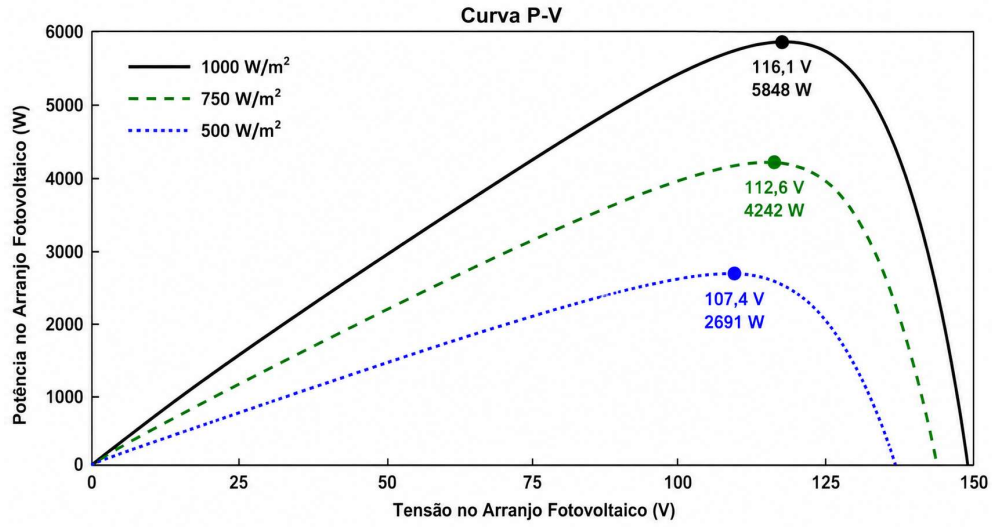
Parâmetro	Grandeza	Especificado	Unidade / Observação
Potência máxima	$P_{\max}$	130	W ($\pm 10\%$ / -5%)
Tensão de potência máxima	V_{MPP}	17,6	V
Corrente de potência máxima	I_{MPP}	7,39	A
Tensão de circuito aberto	V_{oc}	21,9	V
Corrente de curto-circuito	I_{sc}	8,02	A
Nº de células FV	—	36	em série; tipo policristalino
Coef. de temperatura de V_{oc}	$K_{V,oc}$	-0,821	mV/ $^\circ\text{C}$
Coef. de temperatura de I_{sc}	$K_{I,sc}$	+3,18	mA/ $^\circ\text{C}$

Fonte: Autoria própria (2025)

Cada módulo é formado por 36 células de silício policristalino conectadas em série, conferindo ao arranjo final uma tensão total compatível com sistemas de conversão CC–CC de pequeno porte.

A Figura 12 exibe a curva característica potência–tensão (P–V) do arranjo FV proposto a 25°C . Observa-se a presença de um MPP, cuja localização é fortemente influenciada pelas condições ambientais de irradiância e temperatura. Esse comportamento reforça a necessidade de algoritmos MPPT para garantir a extração ótima de energia em tempo real.

Figura 12 – Curvas P–V do arranjo FV a 25 °C



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2 Dimensionamento dos componentes do conversor boost

O desempenho de conversores CC–CC em sistemas fotovoltaicos depende do dimensionamento adequado de seus componentes, de modo a equilibrar eficiência, estabilidade e compatibilidade com algoritmos MPPT (KUMAR et al., 2024). A Tabela 2 apresenta as especificações elétricas adotadas neste estudo para o cálculo dos parâmetros do conversor boost.

Tabela 2 – Parâmetros elétricos adotados para o dimensionamento do conversor boost

Parâmetro	Grandeza	Especificado	Unidade
Frequência de chaveamento	f_s	20	kHz
Ripple da corrente do indutor	Δi_L	0,10	A
Ripple da tensão de saída	ΔV_o	38	V
Tensão de entrada (MPP)	V_P	116,1	V
Tensão de saída desejada	V_o	380	V
Potência máxima	$P_{\max}$	5848	W

Fonte: Autoria própria (2025)

Diversos trabalhos na literatura apresentam metodologias para o dimensionamento de conversores CC–CC do tipo boost, abrangendo desde formulações teóricas até validações experimentais em sistemas fotovoltaicos (RAJ; PRAVEEN, 2022c; NOMAN et al., 2023; LUCANU et al., 2025; ELSAFI et al., 2025). De modo geral, esse dimensionamento envolve a definição criteriosa dos parâmetros fundamentais — indutância (L), capacitância (C), razão cíclica (DC) e resistência de carga equivalente (R) — em função das condições de operação do sistema FV, tais como potência máxima, faixa de tensão de entrada e saída, frequência de chaveamento e limites de ondulação de corrente e tensão.

A resistência de carga equivalente é dada por:

$$R = \frac{V_o^2}{P_{\max}} \quad (27)$$

O ciclo de trabalho é calculado como:

$$DC = \frac{V_o - V_P}{V_o} \quad (28)$$

A indutância é dimensionada segundo:

$$L = \frac{V_P \cdot DC}{f_s \Delta i_L} \quad (29)$$

Para garantir operação em regime de condução contínua (CCM), deve-se respeitar a condição mínima de indutância (NOMAN et al., 2023):

$$L > \frac{(1 - DC)^2 \cdot R}{2f_s} \quad (30)$$

Uma vez estabelecido R , a capacitância é obtida pela Equação 31:

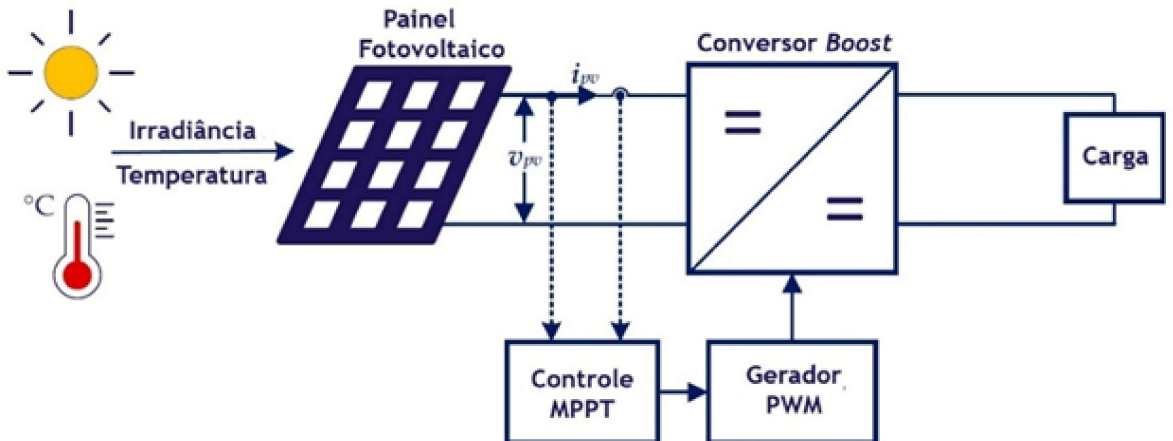
$$C = \frac{DC}{Rf_s \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right)} \quad (31)$$

Na prática, essa relação somente é válida se a condição da Equação 32 for satisfeita (LUCANU et al., 2025):

$$\frac{2Lf_s}{R} \geq (1 - DC)^2 \quad (32)$$

O controle do conversor CC–CC é realizado por meio da técnica de modulação por largura de pulso (PWM), a qual ajusta a razão cíclica previamente definida, modulando a condução da chave eletrônica e regulando o nível de tensão de saída. A Figura 13 ilustra a topologia de um sistema FV com algoritmo MPPT integrado ao conversor CC–CC controlado por PWM, responsável pelo fornecimento de energia à carga.

Figura 13 – Diagrama de sistema FV com conversor CC–CC e MPPT



Fonte: Adaptado de (RUKHSAR et al., 2025)

3.3 Implementação das técnicas MPPT

3.3.1 Controle por histerese independente

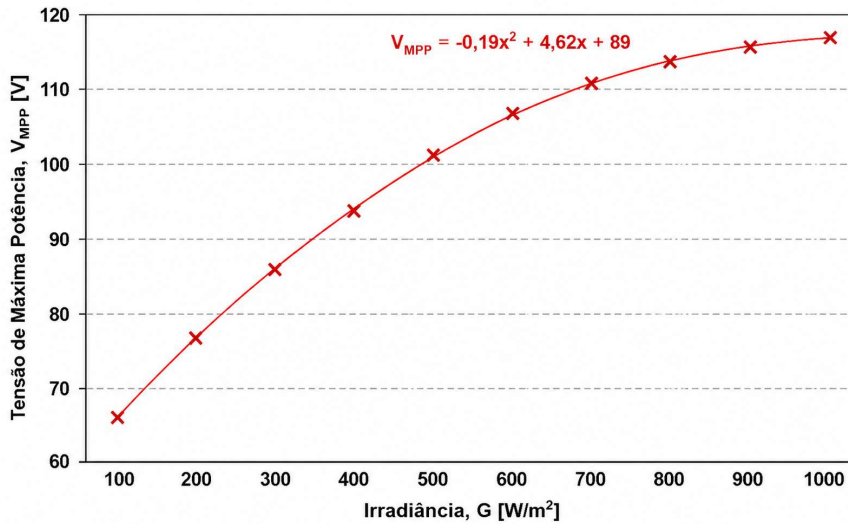
O controle por histerese independente foi implementado a partir da definição de uma banda de tolerância ao redor da corrente de referência do arranjo fotovoltaico. O chaveamento do conversor boost ocorre sempre que a corrente medida no indutor ultrapassa os limites superior ou inferior dessa banda, garantindo resposta rápida às variações ambientais e simplicidade de implementação.

A corrente de referência corresponde à corrente no ponto de máxima potência (I_{MPP}). Para determiná-la, inicialmente estima-se a tensão de máxima potência (V_{MPP}) por meio de uma equação polinomial ajustada experimentalmente para o módulo KC130GT. A relação entre G e V_{MPP} é dada pela Equação 33:

$$V_{MPP}(G) = -0,19G^2 + 4,62G + 89 \quad (33)$$

A Figura 14 exibe a curva ajustada experimentalmente, obtida a partir de amostras de irradiância no intervalo de 100 a 1000 W/m².

Figura 14 – Relação entre tensão de máxima potência (V_{MPP}) e irradiância (G)



Fonte: Autoria própria (2025)

Com V_{MPP} definida, calcula-se a corrente de fotogeração I_{ph} utilizando o modelo da Equação 6, que depende diretamente das medições de irradiância (G) e temperatura (T). Em seguida, substitui-se V_{MPP} na equação característica I-V do módulo fotovoltaico, apresentada na Equação 5, obtendo-se a corrente no ponto de máxima potência I_{MPP} .

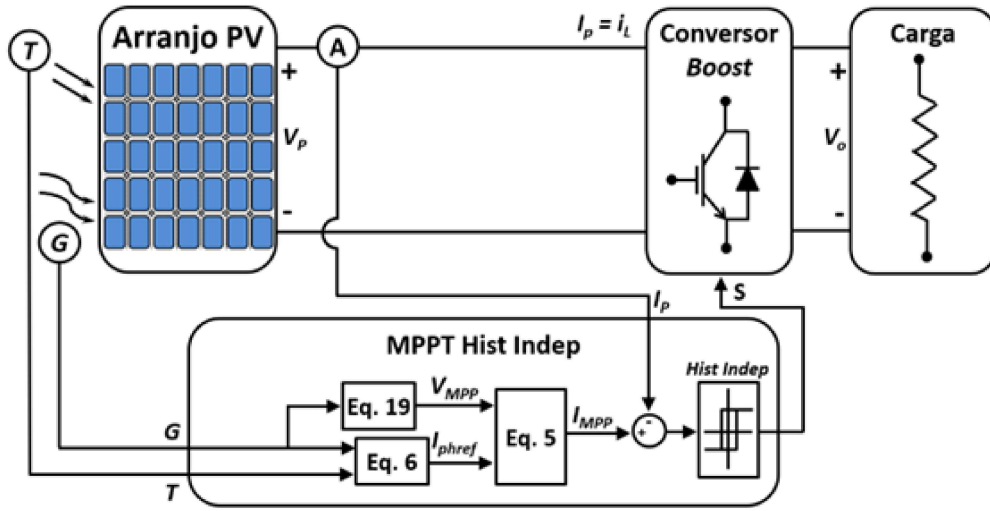
A banda de histerese utilizada foi definida como 0,5% da corrente no ponto de máxima potência sob irradiância de 1000 W/m², resultando em aproximadamente 0,35 A. O algoritmo atua conforme as Equações 34 e 35:

$$\text{Se } i_L > I_{MPP} + \Delta H, \quad S = 0 \quad (34)$$

$$\text{Se } i_L < I_{MPP} - \Delta H, \quad S = 1 \quad (35)$$

A Figura 15 ilustra o diagrama de blocos utilizado na implementação do MPPT por histerese independente, contemplando a estimação de V_{MPP} , o cálculo de I_{MPP} e o circuito de histerese que comanda o estado da chave do conversor.

Figura 15 – Esquemático do controlador MPPT por histerese independente



Fonte: Autoria própria (2025)

Embora seja possível implementar uma versão analógica simplificada, utilizando apenas um sensor de tensão e uma aproximação linear de V_{MPP} , tal alternativa elevaria o erro em regime permanente. Por esse motivo, adotou-se a implementação completa baseada em sensores de irradiância e temperatura, garantindo maior precisão no rastreamento do ponto de máxima potência.

3.3.2 Implementação do controle Proporcional-Integral

Neste estudo, a corrente de referência utilizada pelo controlador corresponde à corrente no ponto de máxima potência (I_{MPP}), obtida a partir da estimação de V_{MPP} pela Equação 33, do cálculo da corrente de fotogeração pela Equação 6 e da solução da equação característica I-V do módulo fotovoltaico, apresentada na Equação 5.

O erro de corrente é definido pela Equação 36:

$$e(t) = I_{MPP} - i_L(t) \quad (36)$$

em que $e(t)$ representa o erro entre a corrente de referência e a corrente medida no indutor.

O sinal de controle é calculado segundo a lei PI apresentada na Equação 37:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (37)$$

em que K_P e K_I representam os ganhos proporcional e integral, respectivamente. O sinal $u(t)$ é aplicado ao conversor boost por meio de Modulação por Largura de Pulso (PWM), determinando o ciclo de trabalho da chave ativa.

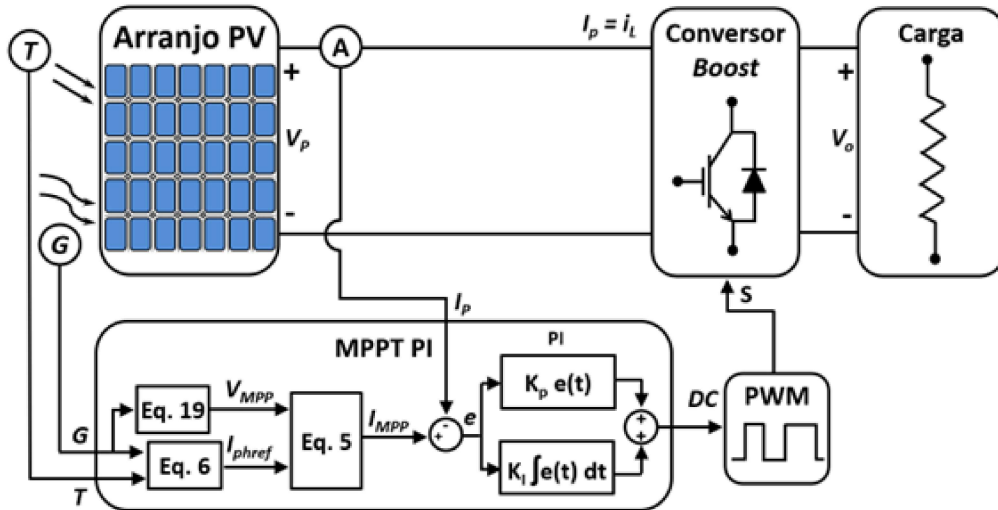
Os valores dos ganhos foram ajustados empiricamente, de forma a equilibrar tempo de resposta, estabilidade e ausência de oscilações excessivas. Após sucessivas iterações, adotaram-se os valores apresentados nas Equações 38 e 39:

$$K_P = 100 \quad (38)$$

$$K_I = 50 \quad (39)$$

A Figura 16 ilustra o diagrama de blocos da implementação do MPPT PI, contemplando o cálculo de I_{MPP} , o controlador PI e o gerador PWM utilizado para comandar a chave do conversor boost.

Figura 16 – Esquemático do controlador MPPT PI



Fonte: Autoria própria (2025)

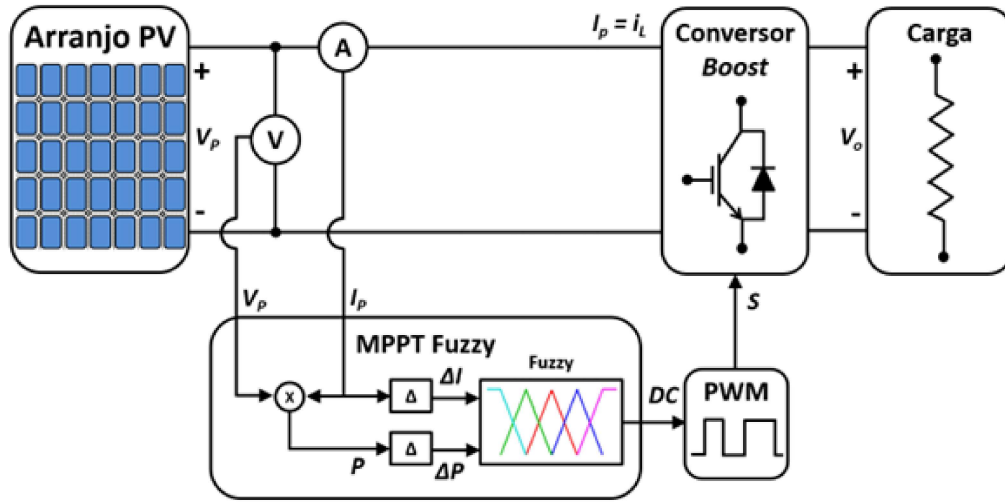
Diferentemente do método por histerese independente, o controlador PI opera com frequência de chaveamento fixa, característica desejável em aplicações práticas. Por outro lado, o desempenho do método é sensível à escolha de K_P e K_I , apresentados nas

Equações 38 e 39, que influenciam diretamente a estabilidade e o tempo de resposta do sistema.

3.3.3 Controle por lógica *fuzzy*

O controle por lógica *fuzzy* foi implementado com o objetivo de realizar o rastreamento do ponto de máxima potência por meio de regras heurísticas, possibilitando a construção de um controlador não linear baseado no comportamento do próprio arranjo fotovoltaico. Esse método utiliza medições de tensão e corrente para estimar a variação de potência e, a partir disso, gerar o ciclo de trabalho aplicado ao conversor boost por modulação PWM, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Esquemático do controlador MPPT baseado em lógica *fuzzy*



Fonte: Autoria própria (2025)

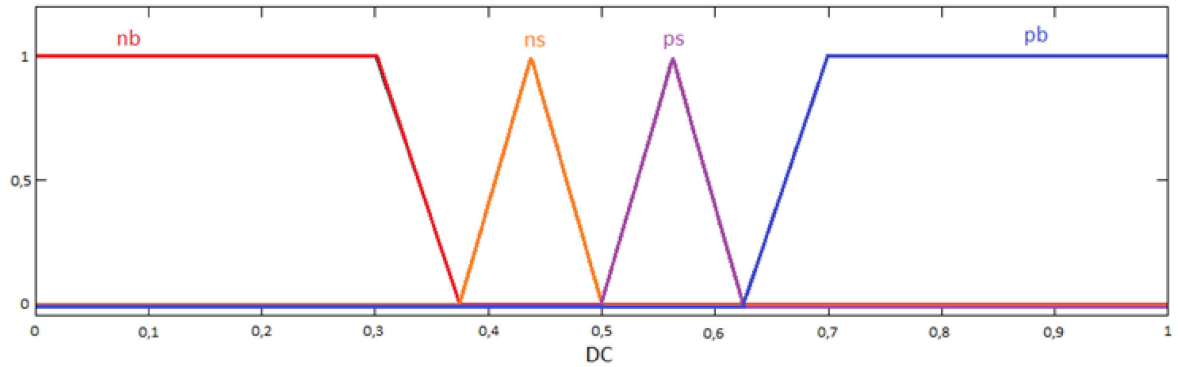
No presente estudo, foram adotadas como variáveis de entrada a variação da potência elétrica (ΔP) e a variação da corrente elétrica (ΔI), calculadas a cada passo de amostragem pelas Equações 40 e 41, respectivamente:

$$\Delta P(k) = P(k) - P(k - 1) \quad (40)$$

$$\Delta I(k) = I(k) - I(k - 1) \quad (41)$$

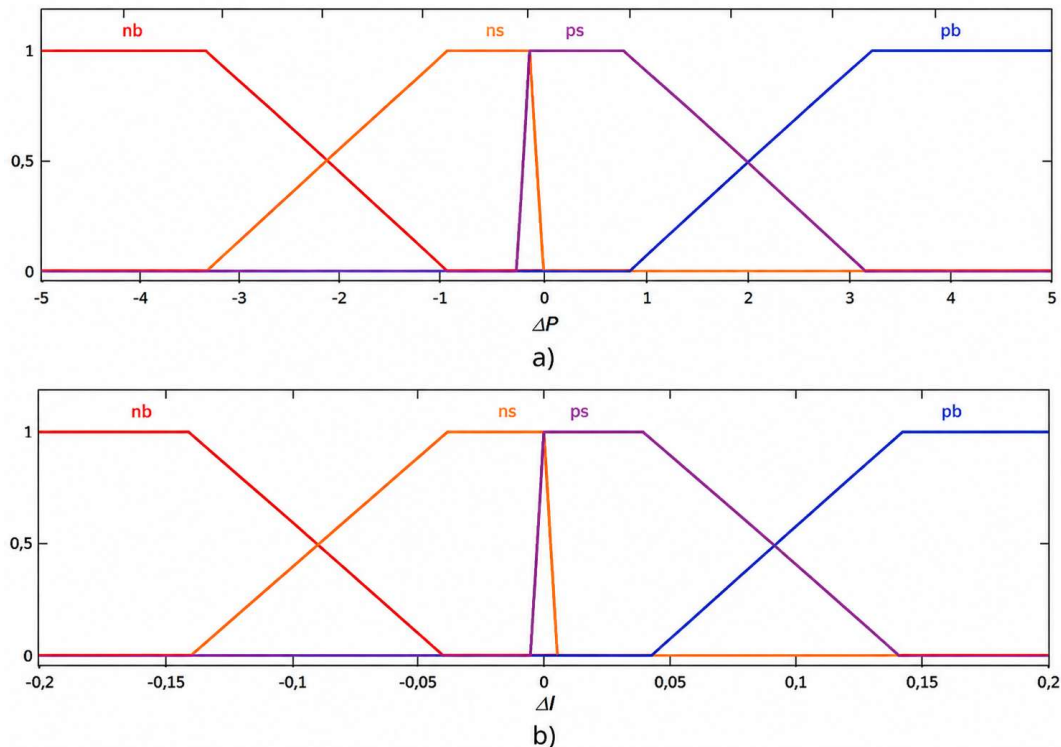
em que $P = VI$ representa a potência instantânea. A variável de saída do sistema *fuzzy* corresponde ao incremento do ciclo de trabalho (DC), aplicado ao gerador PWM.

A função de saída utilizada no controlador é ilustrada na Figura 18, com os conjuntos *fuzzy negative big* (nb), *negative small* (ns), *zero* (z), *positive small* (ps) e *positive big* (pb).

Figura 18 – Função de saída do controlador MPPT *fuzzy*

Fonte: Autoria própria (2025)

As variáveis de entrada ΔP e ΔI foram modeladas utilizando quatro funções de pertinência: *negative big* (nb), *negative small* (ns), *positive small* (ps) e *positive big* (pb). A Figura 19 exibe as funções de pertinência utilizadas no controlador *fuzzy*, sendo a Figura 19(a) correspondente às funções associadas à variação de potência ΔP e a Figura 19(b) referente às funções associadas à variação de corrente ΔI .

Figura 19 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do controlador *fuzzy*: (a) variação de potência ΔP e (b) variação de corrente ΔI 

Fonte: Autoria própria (2025)

A base de regras *fuzzy* adotada no controlador é apresentada na Tabela 3. O mecanismo de inferência utilizado foi o método de Mamdani, enquanto a defuzzificação foi realizada por meio do critério do centro de área (*centroid*). A escolha do modelo

de Mamdani deve-se à sua elevada capacidade de representação linguística e facilidade de interpretação, características que o tornam amplamente empregado em aplicações de controle inteligente. Nesse modelo, as regras são formuladas na estrutura *se-então*, permitindo relacionar diretamente o comportamento do sistema fotovoltaico às ações de controle aplicadas ao conversor Boost.

A construção da base de regras foi realizada de forma heurística, considerando o comportamento esperado da potência e da corrente do arranjo fotovoltaico durante variações de irradiância. Assim, quando as variáveis ΔP e ΔI indicam afastamento do ponto de máxima potência, o controlador ajusta o ciclo de trabalho de maneira a direcionar novamente o sistema para a região ótima de operação. Essa abordagem permite resposta adaptativa sem a necessidade de um modelo matemático rigoroso do sistema.

Além disso, o método *fuzzy* apresenta elevada robustez frente às não linearidades inerentes aos sistemas fotovoltaicos, especialmente em condições de rápida variação climática. Diferentemente de técnicas convencionais baseadas em linearização, o controlador fuzzy consegue incorporar conhecimento qualitativo ao processo de decisão, proporcionando maior flexibilidade e estabilidade dinâmica.

Tabela 3 – Base de regras *fuzzy* adotada no controlador MPPT

$\Delta P \backslash \Delta I$	nb	ns	ps	pb
nb	pb	pb	nb	nb
ns	pb	ps	ns	nb
ps	nb	ns	ps	pb
pb	nb	nb	pb	pb

Fonte: Autoria própria (2025)

A utilização das variáveis ΔP e ΔI , definidas nas Equações 40 e 41, mostrou-se eficiente neste estudo, apresentando melhor desempenho de rastreamento em comparação a alternativas tradicionais baseadas apenas na derivada da potência. O controlador *fuzzy* resultante demonstrou boa estabilidade dinâmica e robustez frente a variações moderadas de irradiância, além de reduzir oscilações próximas ao ponto de máxima potência e contribuir para uma operação mais suave do conversor CC-CC.

4 RESULTADOS

A análise comparativa das três técnicas de MPPT foi realizada a partir de simulações no *MATLAB*, considerando o mesmo arranjo fotovoltaico e o mesmo conversor boost para todas as abordagens. O perfil de irradiância aplicado ao sistema, apresentado na Tabela 4, foi composto por três patamares sucessivos. Essa variação permitiu avaliar a capacidade de rastreamento dinâmico e a estabilidade em regime permanente de cada método.

Tabela 4 – Variação da irradiância com o tempo

Tempo (s)	Irradiância (W/m^2)
0–1	500
1–2	750
2–3	1000

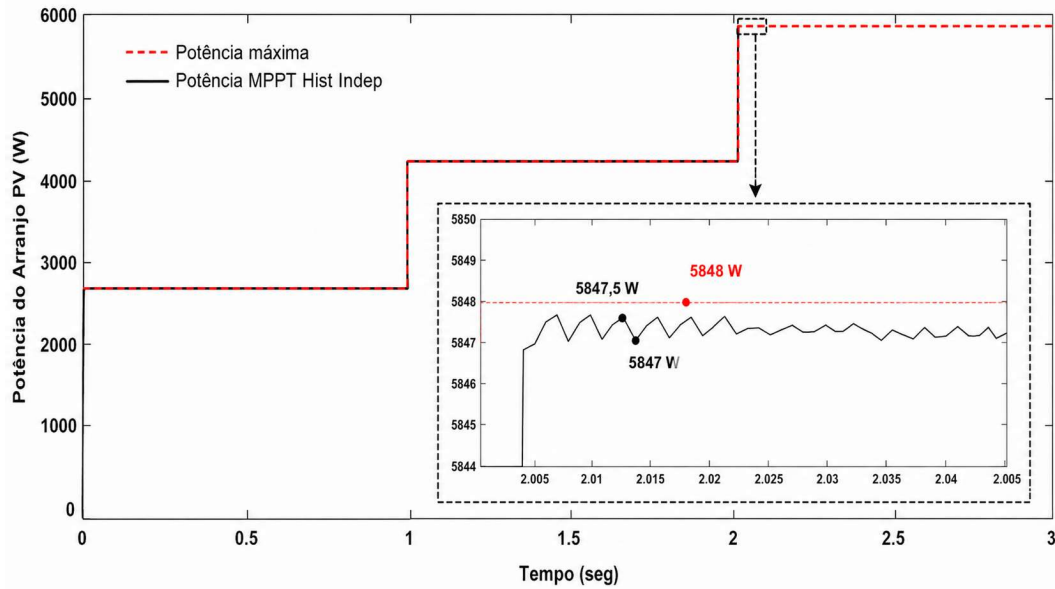
Fonte: Autoria própria (2025)

As simulações foram realizadas com os mesmos parâmetros do conversor boost ($R = 25 \, \Omega$, $L = 40 \, \text{mH}$, $C = 15 \, \mu\text{F}$), escolhidos entre valores comerciais. A frequência de chaveamento permaneceu variável no MPPT por histerese independente e fixa em 20 kHz nos controladores PI e *fuzzy*, assegurando condições equitativas de comparação.

4.1 MPPT por histerese independente

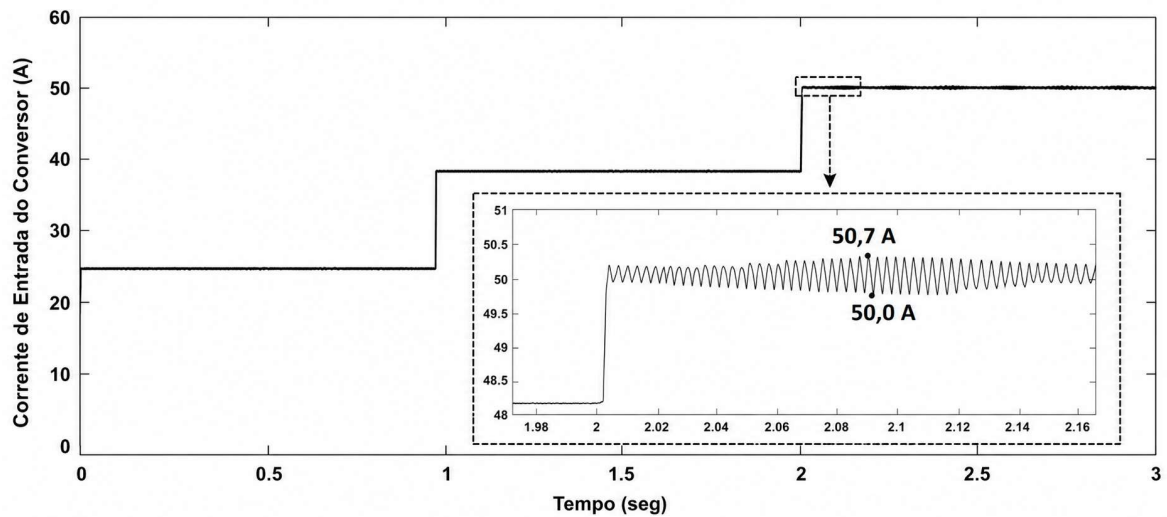
A Figura 20 exibe a potência extraída utilizando o método de histerese independente. No gráfico, o eixo horizontal representa o tempo de simulação, variando de 0 a 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a potência extraída pelo sistema fotovoltaico, expressa em watts (W). O algoritmo demonstrou resposta rápida frente às mudanças de irradiância, estabelecendo o regime permanente em aproximadamente 5 ms. O erro de potência residual permaneceu em torno de 1 W, indicando precisão satisfatória.

Figura 20 – Potência extraída utilizando o MPPT por histerese independente



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 21 mostra a corrente do indutor ao longo do tempo. O eixo horizontal corresponde ao tempo de simulação, variando de 0 a 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a corrente no indutor i_L , expressa em ampères (A). Observa-se que a corrente apresenta oscilações mais pronunciadas, consequência direta da operação em banda de histerese, que faz o conversor comutar sempre que a corrente ultrapassa os limites pré-definidos.

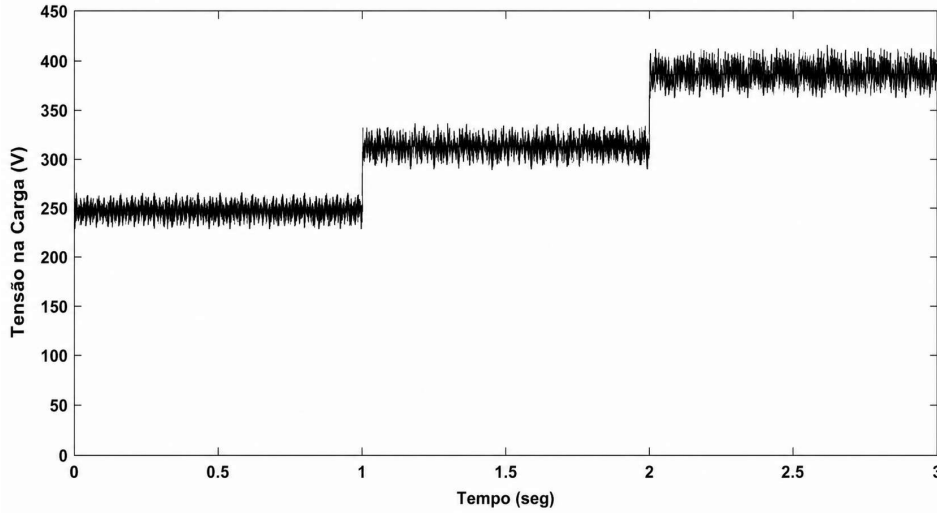
Figura 21 – Corrente do indutor (i_L) utilizando o MPPT por histerese independente

Fonte: Autoria própria (2025)

A tensão de saída exibida na Figura 22 é apresentada em função do tempo. No gráfico, o eixo horizontal representa o tempo de simulação, variando de 0 a 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a tensão na carga V_o , expressa em volts (V). Observa-se maior

sensibilidade às variações transitórias, com pequenas oscilações durante os degraus de irradiância. Esse comportamento sugere aumento do esforço dinâmico sobre os dispositivos de potência, algo que deve ser considerado em implementações práticas, pois tende a elevar as perdas por chaveamento.

Figura 22 – Tensão na carga (V_o) utilizando o MPPT por histerese independente

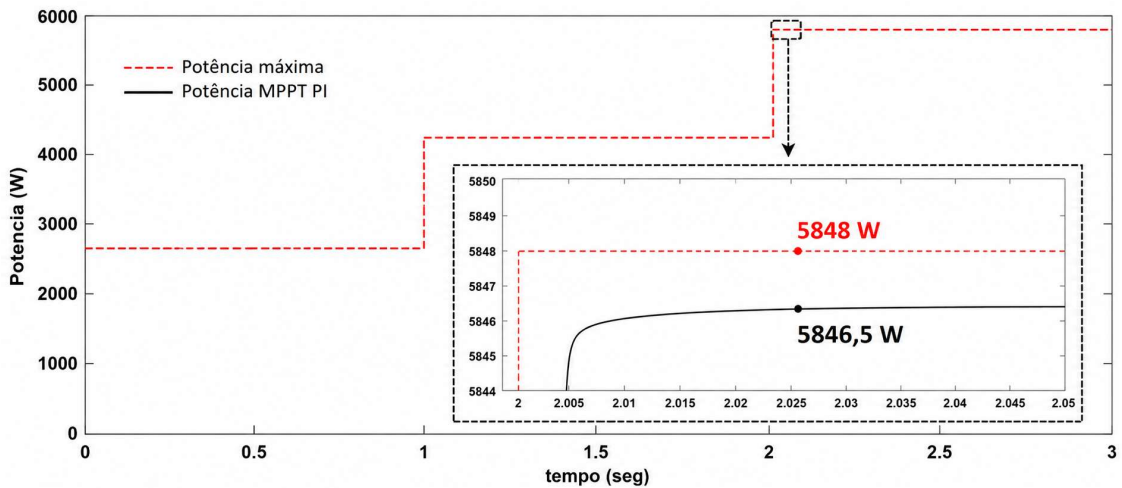


Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 MPPT baseado em controle PI

A Figura 23 mostra o desempenho da técnica com controle PI. No gráfico, o eixo horizontal representa o tempo de simulação, variando de 0 a 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a potência extraída pelo sistema fotovoltaico, expressa em watts (W). Observa-se que a potência apresenta comportamento suave e atinge o regime permanente em cerca de 6 ms, com erro aproximado de 1,5 W. Embora mais lento que o método de histerese, o controlador PI entrega uma resposta mais uniforme, sem oscilações perceptíveis.

Figura 23 – Potência extraída utilizando o MPPT por controle PI

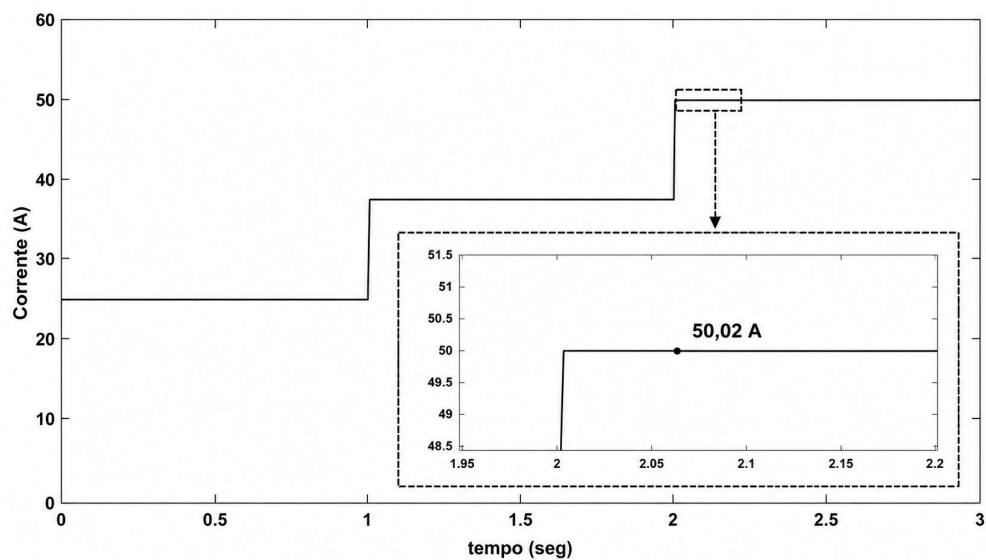


Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 24 apresenta a corrente no indutor em função do tempo. No gráfico, o eixo horizontal representa o tempo de simulação, variando de 0 a 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a corrente do indutor i_L , expressa em ampères (A). Observa-se que a corrente apresenta *ripple* reduzido, graças à frequência de chaveamento fixa. Esse comportamento contribui para a operação estável do conversor, reduzindo o estresse sobre os semicondutores.

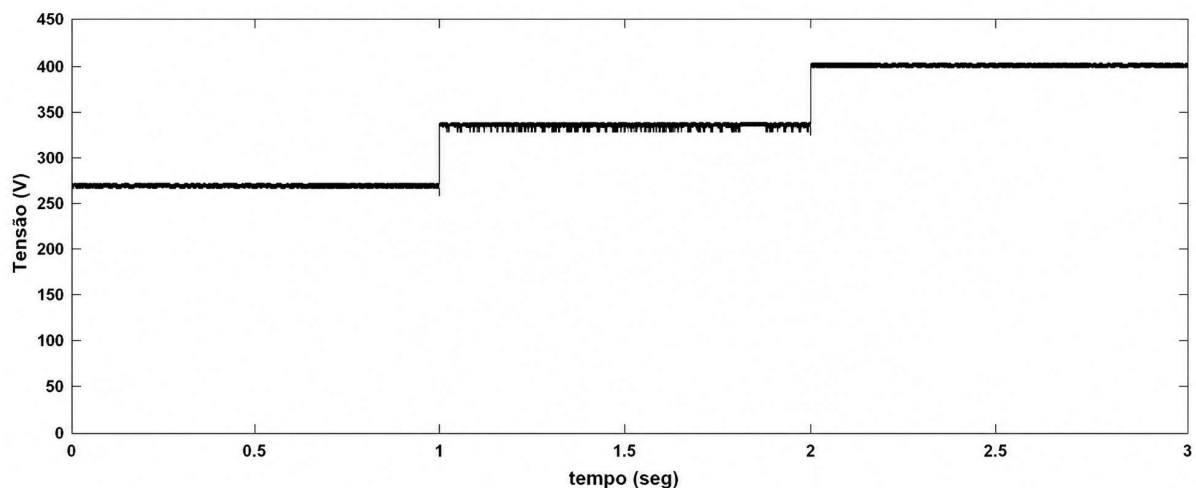
De forma semelhante, a Figura 25 apresenta a tensão na carga ao longo do tempo. O eixo horizontal representa o tempo de simulação, entre 0 e 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a tensão de saída V_o , expressa em volts (V). Observa-se que a tensão permaneceu estável durante toda a simulação, apresentando variação de aproximadamente 5 V mesmo durante as mudanças de irradiância.

Figura 24 – Corrente do indutor (i_L) utilizando o MPPT por controle PI



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 25 – Tensão na carga (V_o) utilizando o MPPT por controle PI

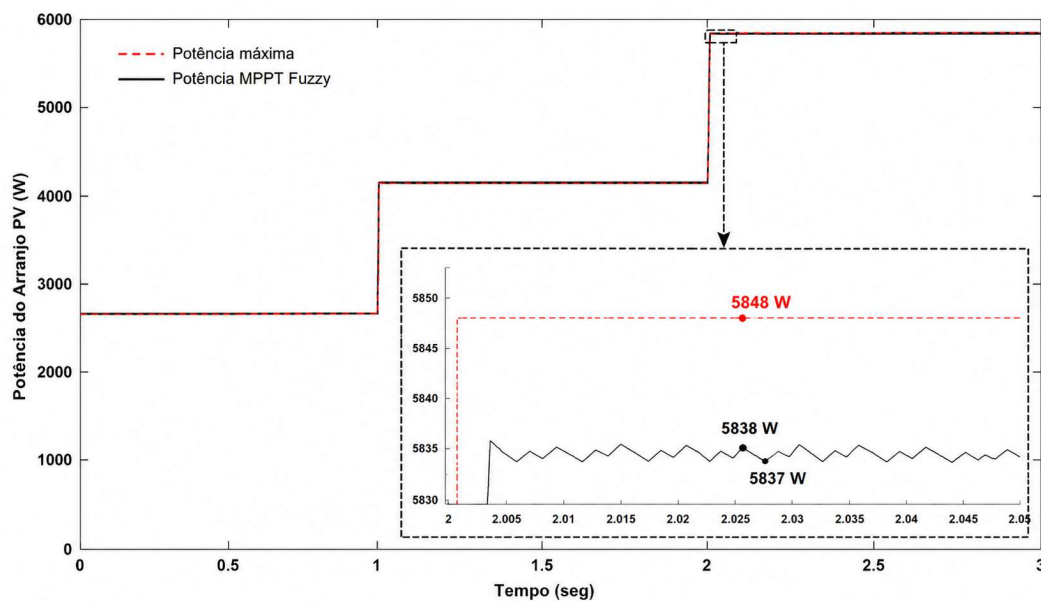


Fonte: Autoria própria (2025)

4.3 MPPT baseado em lógica *fuzzy*

A Figura 26 apresenta a potência extraída pelo MPPT *fuzzy*. No gráfico, o eixo horizontal representa o tempo de simulação, variando de 0 a 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a potência extraída pelo sistema fotovoltaico, expressa em watts (W). A técnica exibiu tempo de acomodação semelhante ao método por histerese, cerca de 5 ms, porém com erro em regime permanente maior, por volta de 10 W. Essa diferença é característica de controladores *fuzzy* em malha aberta, cujo desempenho depende diretamente da qualidade das funções de pertinência e das regras definidas.

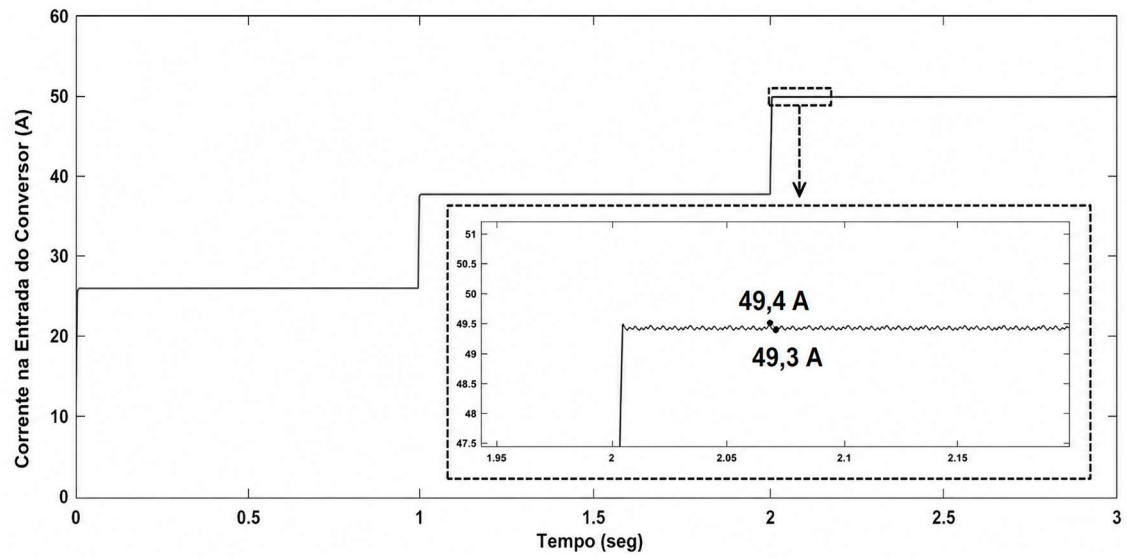
Figura 26 – Potência extraída utilizando o MPPT por lógica *fuzzy*



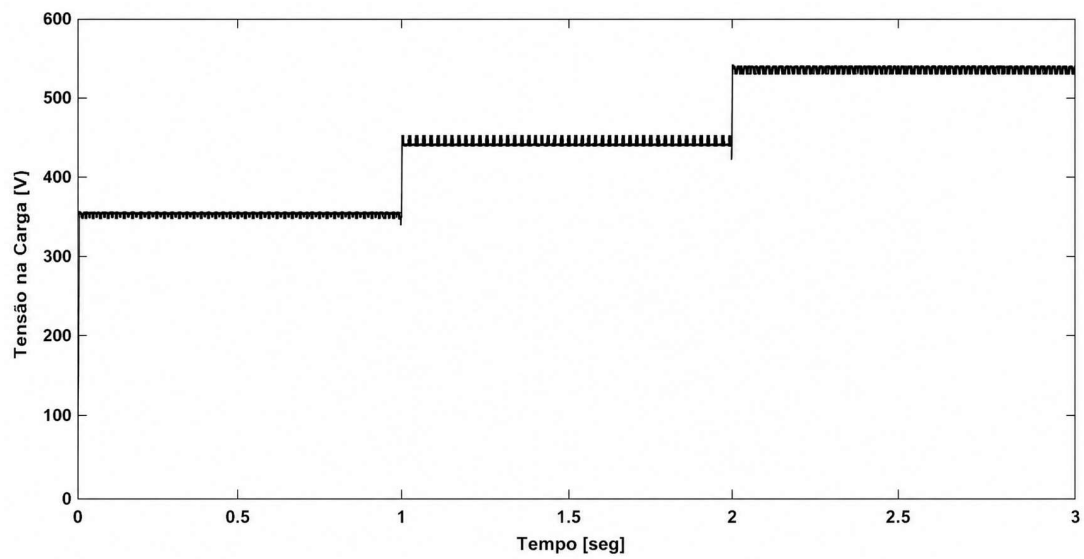
Fonte: Autor própria(2025)

A Figura 27 apresenta a corrente do indutor ao longo do tempo. No gráfico, o eixo horizontal representa o tempo de simulação, variando de 0 a 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a corrente no indutor i_L , expressa em ampères (A). Observa-se que a corrente permanece praticamente constante durante toda a simulação, reduzindo o desgaste dos componentes eletrônicos e contribuindo para o aumento da eficiência do conversor.

Já a Figura 28 apresenta a tensão de saída em função do tempo. O eixo horizontal representa o tempo de simulação, entre 0 e 0,3 s, enquanto o eixo vertical representa a tensão na carga V_o , expressa em volts (V). Observa-se baixa variação da tensão durante os três patamares de irradiância, indicando boa capacidade de estabilização mesmo em condições dinâmicas.

Figura 27 – Corrente do indutor (i_L) utilizando o MPPT por lógica *fuzzy*

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 28 – Tensão na carga (V_o) utilizando o MPPT por lógica *fuzzy*

Fonte: Autoria própria (2025)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a modelagem de um arranjo fotovoltaico conectado a um conversor boost para o rastreamento do MPP por meio de técnicas de controle de corrente baseadas em histerese independente e proporcional–integral. O tempo de processamento computacional dos métodos avaliados foi semelhante, variando entre 3 e 4 minutos em um processador Intel Core i7-4500U utilizando o software MATLAB (versão R2016a).

Os resultados obtidos permitiram avaliar o desempenho das três abordagens de MPPT, destacando características individuais relevantes para aplicações práticas. O método por Histerese Independente apresentou o menor erro de potência em regime permanente e a resposta dinâmica mais rápida diante das variações de irradiância. Já o controlador PI, embora com maior tempo de subida e acomodação, demonstrou comportamento estável e erro estacionário inferior ao observado no método baseado em lógica *fuzzy*.

Ambas as estratégias — Histerese Independente e PI — apresentam a vantagem da simplicidade de implementação quando comparadas ao MPPT *fuzzy*. No entanto, demandam o uso de sensores adicionais, sobretudo de irradiância e temperatura, o que pode aumentar o custo do sistema. Além disso, o MPPT por Histerese Independente possui como limitação a frequência de chaveamento variável, podendo impor maior estresse aos dispositivos de potência. Essa restrição, contudo, pode ser amenizada por técnicas alternativas, como a comparação com onda triangular de frequência fixa (Ramp Comparison).

Os resultados confirmam que métodos de controle de corrente podem ser empregados de forma eficaz no rastreamento do ponto de máxima potência em arranjos fotovoltaicos, proporcionando rápida resposta dinâmica e operação confiável sob condições variáveis de irradiância. Observou-se também que o MPPT *fuzzy*, apesar de mais robusto, apresenta maior complexidade computacional e maior sensibilidade a ruídos, fatores que limitam sua aplicação prática em ambientes reais.

Como perspectivas futuras, destaca-se a necessidade de realizar a validação experimental dos métodos em bancada, aplicação das técnicas em sistemas híbridos fotovoltaico–bateria e o desenvolvimento de algoritmos híbridos que integrem controladores clássicos e abordagens de inteligência artificial. Assim, os resultados obtidos confirmam a viabilidade das estratégias de controle de corrente como alternativas eficazes para aplicações práticas em sistemas fotovoltaicos.

Referências

- ABSOLAR. *Boletim Anual de Energia Solar no Brasil 2025*. 2025. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/>>. Acesso em: 10 out. 2025. Citado na página 13.
- ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. *Power Electronics for Renewable Energy Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 19.
- AFRE, R. A.; PUGLIESE, D. Perovskite solar cells: A review of the latest advances in materials, fabrication techniques, and stability enhancement strategies. *Micromachines*, v. 15, n. 2, p. 192, 2024. Citado na página 21.
- AL-EZZI, A. S.; ANSARI, M. N. M. Photovoltaic solar cells: A review. *Applied System Innovation*, v. 5, n. 4, p. 67, 2022. Citado na página 19.
- ALY, S. P.; AHZI, S.; BARTH, N. An adaptive modelling technique for parameters extraction of photovoltaic devices under varying sunlight and temperature conditions. *Applied Energy*, v. 236, p. 728–742, 2019. Citado na página 24.
- ALZATE, L.; GIRALDO, J.; CASTRO, A. Performance assessment of fuzzy logic mppt under environmental variability. *Renewable Energy*, v. 205, p. 64–75, 2023. Citado na página 14.
- ANEEL. *Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021*. 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Citado na página 17.
- BARADIEH, K. I. et al. A study on the impact of different PV model parameters and various DC faults on the characteristics and performance of the photovoltaic arrays. *Inventions*, v. 9, n. 5, p. 93, 2024. Citado na página 34.
- Canal Solar. *Entenda os Inversores com Múltiplos MPPT*. 2019. <<https://canalsolar.com.br/inversores-com-multiplos-mppt/>>. Acesso em: 14 nov. 2025. Citado na página 29.
- CAVALCANTI, M. C.; OLIVEIRA, K. C.; AZEVEDO, G. M. S. Evaluation of maximum power point tracking methods for photovoltaic systems. In: *IEEE Conference on Industrial Electronics*. Paris: [s.n.], 2006. p. 204–209. Citado na página 13.
- COELHO, F.; SCHMITZ, C.; MARTINS, R. Aplicações de lógica fuzzy em sistemas eletrônicos. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*. [S.l.: s.n.], 2022. Citado na página 31.
- CRESESB. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Citado 4 vezes nas páginas 16, 17, 18 e 24.
- ELKHATEEB, A.; ELSAYED, M. Design and performance evaluation of pi control in photovoltaic converters. *Journal of Power Electronics*, v. 20, n. 5, p. 1112–1123, 2020. Citado na página 14.
- ELSAFI, A. et al. Comparative analysis of maximum power point tracking methods for power optimization in grid-tied photovoltaic solar systems. *Discover Applied Sciences*, v. 7, p. 976, 2025. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 35.

GHAZALI, M. F.; HASSAN, S.; RAHMAN, A. Performance analysis of hysteresis current control for pv systems under partial shading. *Energy Reports*, v. 7, p. 568–578, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

GREEN, M. A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics*, v. 28, n. 12, p. 1083–1093, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 16, 19 e 21.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 56). *Progress in Photovoltaics*, v. 28, n. 7, p. 629–638, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

GRUNER, D. et al. Evaluation of classical mppt methods under dynamic conditions. *Energy Conversion and Management*, 2023. Citado na página 28.

HAI, N.; LEE, J.; CHOI, S. Fuzzy logic-based mppt for photovoltaic systems under rapidly changing irradiance. *Energy Conversion and Management*, v. 256, p. 115349, 2022. Citado na página 14.

HEGAZY, M.; SHOKAIR, M.; SAAD, W. Advanced mppt techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023. Citado na página 28.

IEA. *Renewables 2025: Analysis and Forecast to 2030*. 2025. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2025>>. Acesso em: 10 out. 2025. Citado na página 13.

INSTITUTO SOLAR. *Kit de Energia Solar*. 2019. <<https://institutosolar.com/kit-de-energia-solar/>>. Acesso em: 30 out. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

International Energy Agency. *Solar Photovoltaic Technology Brief*. 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>>. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 20.

JIN, Z. et al. Real-time maximum power point tracking techniques for pv generation. *Renewable Energy*, 2017. Citado na página 28.

KARAMI, N.; MOUBAYED, N.; OUTBIB, R. General review and classification of different mppt techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 1–18, 2017. Citado na página 13.

KISHORE, P.; KUMAR, D.; IPPILI, S. *Solar Photovoltaic Energy Systems: Principles and Applications*. Singapore: Springer, 2025. Citado na página 13.

KUMAR, M. et al. Enhanced optimization techniques for parameter estimation of single-diode pv modules. *Electronics*, v. 13, n. 15, p. 2934, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 35.

LONGI. *LONGi Breaks World Record for Crystalline Silicon-Perovskite Tandem Solar Cell Efficiency*. 2025. Acesso em: 27 maio 2026. Disponível em: <<https://www.longi.com/en/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>>. Citado na página 21.

LUCANU, D.; OTHERS. Dynamic modeling of boost converters for solar applications. *IEEE Access*, 2025. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

- MA, T.; YANG, H.; LU, L. An improved and comprehensive mathematical model for photovoltaic modules under real operating conditions. *Solar Energy*, v. 184, p. 292–304, 2019. Citado na página 24.
- MOHAMMAD, A.; OTHERS. Advances in mppt-integrated dc–dc converters for pv applications. *Solar Energy Reviews*, 2025. Citado na página 25.
- National Renewable Energy Laboratory. *Best Research-Cell Efficiency Chart*. 2023. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.
- National Renewable Energy Laboratory. *Best Research-Cell Efficiency Chart*. 2026. Acesso em: 27 maio 2026. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Citado na página 21.
- NGUYEN-VAN, H.; ABE, T.; TANAKA, T. Hysteresis current control method for photovoltaic boost converter under variable irradiance. *Solar Energy*, v. 176, p. 265–275, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- NGUYEN-VAN, T.; ABE, R.; TANAKA, K. Mppt and sppt control for pv-connected inverters using digital adaptive hysteresis current control. *Energies*, v. 11, n. 8, p. 2075, 2018. Citado na página 29.
- NOMAN, A.; OTHERS. Continuous conduction mode operation in dc–dc boost converters. *Energy Conversion Journal*, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 26, 35 e 36.
- OCA ENERGIA. *Sistema Fotovoltaico Híbrido: entenda o que é*. 2025. <<https://www.ocaenergia.com/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/>>. Acesso em: 30 out. 2025. Citado na página 19.
- RAJ, A.; PRAVEEN, R. Optimized pi controller design for dc–dc boost converter in photovoltaic systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, v. 12, n. 3, p. 955–963, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 26.
- RAJ, P.; PRAVEEN, J. Design and analysis of dc–dc boost converters for renewable energy systems. *International Journal of Power Electronics*, 2022. Citado na página 26.
- RAJ, P.; PRAVEEN, R. Performance analysis and design of dc–dc boost converters for pv systems. *Solar Energy Journal*, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 35.
- RAZYKOV, T. M. et al. A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications. *Energies*, v. 15, n. 5, p. 1823, 2022. Citado na página 19.
- RUKHSAR, S. et al. Integrated pv system with mppt and pwm-based dc–dc converter. *International Journal of Power Electronics*, 2025. Citado na página 36.
- SEYEDMAHMOUDIAN, M. et al. A review on fuzzy logic applications in photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 261–276, 2016. Citado na página 32.
- SILVESTRE, R. *Fundamentos de Sistemas Fotovoltaicos*. 2024. Material técnico. Citado na página 28.

SOTO, W. D.; KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, v. 80, p. 78–88, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

Sunflower Solar. *Types of Solar Cells*. 2025. Acesso em: 19 maio 2026. Disponível em: <http://www.sunflower-solar.com/index_pt.php?act=content&scheduler_id=2029>. Citado na página 20.

SUTIKNO, T.; OTHERS. High-efficiency boost converters for photovoltaic mppt systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023. Citado na página 26.

TADJ, M. et al. Enhanced mppt-based fractional-order pid for pv systems using aquila optimizer. *Mathematical and Computational Applications*, v. 28, n. 5, p. 99, 2023. Citado na página 34.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. São Paulo: Érica, 2021. Citado na página 16.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

VILLEGAS-MIER, R. et al. Embedded mppt architectures for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 2021. Citado na página 28.

WANG, H.; LIU, P. Dynamic modeling of photovoltaic modules under environmental fluctuations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 15, n. 2, p. 850–861, 2024. Citado na página 24.

XIAO, W.; DUNFORD, W. G. A modified adaptive hill climbing method for mppt for photovoltaic power systems. In: *IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 1957–1963. Citado na página 13.

YANG, C. et al. Achievements, challenges, and future prospects for perovskite solar cells. *Light: Science & Applications*, v. 13, 2024. Citado na página 21.

YAP, K. Y.; SARIMUTHU, C.; LIM, Y. S. A comprehensive review of ai-based mppt techniques for pv systems under partial shading conditions. *Energy*, v. 201, p. 117–131, 2020. Citado na página 32.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. Citado na página 31.

ZHANG, L.; SUN, Q.; LI, Y. Thermal and electrical behavior of crystalline silicon pv modules. *Renewable Energy*, v. 150, p. 122–132, 2020. Citado na página 24.

ZHANG, L.; WANG, J.; XU, T. Temperature-induced degradation and performance modeling of pv modules. *Energy Reports*, v. 8, p. 1105–1117, 2022. Citado na página 24.

ZHANG, Y. et al. Modelling and estimating performance for pv module under varying operating conditions independent of reference condition. *Applied Energy*, v. 310, p. 118527, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.